

DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS, A PARTIR DE LA
MEZCLA DE ASFALTO Y ACEITE CRUDO DE PALMA (ELAEIS GUINEENSIS)

CONRADO HERNANDO LOPERA PALACIO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
MEDELLÍN
2011

DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS A PARTIR DE LA
MEZCLA DE ASFALTO Y ACEITE CRUDO DE PALMA

Por:

CONRADO HERNANDO LOPERA PALACIO

Informe final de investigación aplicada presentado como requisito para optar al
título de Máster en Ingeniería Infraestructura y Sistemas de Transporte

Director

Jorge Eliécer Córdoba Maquilón Ph.D.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
MEDELLÍN
2011

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Medellín, noviembre 15 de 2011

DEDICATORIA

A todas aquellas personas que hicieron posible la realización de esta investigación.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
2. JUSTIFICACIÓN	27
3. OBJETIVOS	29
3.1 OBJETIVO GENERAL	29
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
4. MARCO TEÓRICO	30
4.1 ANTECEDENTES	30
4.1.1 Las mezclas tibias	32
4.1.2 Antecedentes cronológicos en el trabajo con Mezclas Tibias (WMA)	33
4.2 BENEFICIOS DE LA MEZCLA TIBIA	35

	pág.
4.2.1 Consumo de energía	35
4.2.2 Emisiones	36
4.2.3 Viscosidad	37
4.2.4 Técnicos	37
4.3 ESTUDIOS COMPARATIVOS SOBRE LAS VENTAJAS DE LAS MEZCLAS TIBIAS	38
4.3.1 Emisiones y exposición laboral a temperaturas inferiores de Producción y extensión de mezclas asfálticas	38
4.4 MÉTODOS PARA PRODUCIR MEZCLAS TIBIAS	47
4.4.1 Sistemas mediante el uso de aditivos	49
4.4.2 Sistemas a base de espuma (1/3) - Zeolita	50
4.4.3 Sistemas a base de espuma (2/3) – LEA	51
4.4.4 Sistemas a base de espuma (3/3). Planta de Doble Tambor	52
4.4.5 Sistema de doble envuelta – Shell WAM foam	53
4.4.6 Sistema basado en emulsión	54

	pág.
4.5 EL CRUDO DE PALMA	55
4.5.1 Historia	55
4.5.2 La planta	57
4.5.3 Proceso Agroindustrial	58
4.5.4 Usos	59
4.5.5 La palma de aceite como cultivo ecológico	60
5. METODOLOGÍA	62
5.1 TIPO DE ESTUDIO	62
5.2 ORGANIZACIÓN, SISTEMATIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS	62
5.3 ALCANCE DEL TRABAJO	64
5.3.1 Resultado 1	64
5.3.2 Resultado 2	64
5.3.3 Resultado 3	64
6. RESULTADOS DEL ESTUDIO	66

	pág.
6.1 DESARROLLO DEL PROCESO	66
6.1.1 Objetivo Uno	66
6.1.1.1 Muestra 1	66
6.1.1.2 Muestra 2	67
6.1.1.3 Muestra 3	68
6.1.2 Caracterización del asfalto Base	69
6.1.3 Dosificación en laboratorio Crudo de palma Asfalto	70
6.1.3.1 Resultados dosificación crudo de palma Dismaprim	71
6.1.3.2 Resultados dosificación crudo de palma Palmagro	74
6.1.4 Caracterización de Materiales	77
6.1.4 Diseño Marshall	83
6.1.4.1. Objetivo	83
6.1.4.2. Características de los agregados	83
6.1.4.3 Características del cemento asfáltico	86

	pág.
6.1.4.4 Determinación de las temperaturas de mezclado y compactación	86
6.1.4.5 Diseño Marshall	86
6.1.4.6 Fórmula de trabajo	89
6.1.4.7 Relación llenante / ligante efectivo	89
6.1.4.8 Concentración crítica del llenante	90
6.1.4.9 Resistencia conservada mediante el ensayo de tracción indirecta	90
6.1.4.10 Índice de película de ligante	92
6.2 RESULTADOS	92
6.2.1 Generalidades	92
6.2.2 Procedimientos	93
6.2.2.1 Peso específico aparente y unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes saturados con superficie seca	93
6.2.2.2 Módulos Dinámicos	93
6.2.2.3 Deformación Permanente	94

	pág.
6.2.2.4. Fatiga por Tracción Indirecta (Fatiga a esfuerzo controlado)	94
6.2.3 Resultados del estudio técnico	95
6.2.3.1 Módulos dinámicos, ITSM	95
6.2.3.2. Deformación permanente	96
6.2.3.3 Fatiga a esfuerzo controlado	98
CONCLUSIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	102

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Reducciones en las temperaturas para obtener mezclas asfálticas mediante diferentes métodos	31
Tabla 2. Antecedentes cronológicos de la producción de mezclas tibias WMA	33
Tabla 3. Valores de exposición	45
Tabla 4. Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura	48
Tabla 5. Objetivos y actividades de la investigación	62
Tabla 6. Características técnicas generales del Crudo de Palma	66
Tabla 7. Características del crudo de palma de Dismaprim	67
Tabla 8. Características del crudo de palma de Palmagro	68
Tabla 9. Características del crudo de palma de Santa Marta	68
Tabla 10. Ensayo de viscosidad asfalto base	69
Tabla 11. Dosificación del crudo de palma versus Cemento asfáltico Base 60-70	71

	pág.
Tabla 12. Viscosidades a Diferentes Temperaturas para concentraciones de Aceite de Palma Dismaprin	71
Tabla 13. Variaciones con adiciones de aceite Dismaprim	72
Tabla 14. Viscosidades a Diferentes Temperaturas para concentraciones de Aceite de Palma Palmagro	74
Tabla 15. Variaciones con adiciones de aceite Palmagro	75
Tabla 16. Caracterización de materiales	77
Tabla 17. Características granulométricas de la muestra	84
Tabla 18. Caracterización del agregado grueso	84
Tabla 19. Caracterización del agregado fino	85
Tabla 20. Caracterización del llenante	85
Tabla 21. Caracterización de los agregados combinados	85
Tabla 22. Características del cemento asfáltico	86
Tabla 23. Índice de película de ligante	92
Tabla 24. Recepción y descripción de materiales	92

	pág.
Tabla 25. Fecha de realización de ensayos	93
Tabla 26. Resumen Módulos dinámicos de la mezcla G-115-11	95
Tabla 27. Deformación permanente de mezclas asfálticas. G-115-11	97
Tabla 28. Resultados del análisis de Ley de Fatiga G-115-11	98
Tabla 29. Constantes de ecuación de ley de fatiga G-115-11	99
Tabla 30. Cuadro comparativo de desempeño	100

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Reducciones registradas en las emisiones de planta en la producción de mezcla	35
Figura 2. Niveles de emisión de CO ₂ en tres momentos de medida en la planta de asfalto	42
Figura 3. Niveles de emisión de CO y NO _x en tres momentos de medida en la planta de asfalto	43
Figura 4. Niveles de emisión de SO ₂ y polvo en tres momentos de medida en la planta de asfalto	43
Figura 5. Emisiones en la planta asfaltadora	44
Figura 6. Emisiones PAH según resultados del estudio	46
Figura 7. Rangos de temperatura para producción de Mezclas asfálticas	48
Figura 8. Apariencia del aditivo granulado. Sasobit	50
Figura 9. Estructura de la zeolita, bajo microscopio	51
Figura 10. Fases para producir mezcla tibia tecnología LEA	52
Figura 11. Sistema de inyección del asfalto en forma de espuma	53
Figura 12. Sistema de doble envuelta – Shell WAM foam	54

	pág.
Figura 13.Etapas para producir mezcla tibia basada en emulsión	55
Figura 14. Distribución geográfica de los principales productores de palma de aceite en Colombia	57
Figura 15. Plantas de palma de aceite	58
Figura 16. Planta de beneficio de palma de aceite	59
Figura 17. Algunos de los usos de la palma de aceite	60
Figura 18. Curva reologica asfalto base	70
Figura 19. Curvas de viscosidad de asfalto con adición de aceite Dismaprim	72
Figura 20. Variación de la viscosidad con adiciones de aceite Dismaprim	73
Figura 21. Variación de las temperaturas de trabajo con adiciones de Dismaprim	73
Figura 22. Curvas de viscosidad de asfalto con adición de aceite Palmagro	75
Figura 23. Variación de la viscosidad con adiciones de aceite Palmagro	76
Figura 24. Variación de las temperaturas de trabajo con adiciones de Palmagro	76
Figura 25. Análisis granulométrico	82

	pág.
Figura 26. Curvas Marshall	91
Figura 27. Curva Maestra del módulo dinámico. G-115-11	96
Figura 28. Deformación permanente de la mezcla asfáltica G-115-11	97
Figura 29. Fatiga a esfuerzo controlado para los especímenes	99

RESUMEN

El aumento de la conciencia ambiental y una regulación más estricta de las emisiones atmosféricas han llevado a un desarrollo de producción de mezclas asfálticas tibias (WMA).

Las mezcla asfáltica tibias son aquellas que se producen a una temperatura menor que las mezclas en calientes y pretende reducir la viscosidad del asfalto hasta lograr una adecuada envuelta de los agregados y el asfalto.

Existen varias tecnologías que proporcionan esta reducción de la viscosidad a bajas temperaturas, entre otras podemos mencionar: los sistemas de aditivos, Sistemas a base de espuma, zeolitas, la tecnología LEA, Sistema de doble envuelta, entre otros. Entre los beneficios de utilizar mezclas tibias en la pavimentación se pueden mencionar los siguientes:

- Facilidad para compactar empleando menos esfuerzos y menor temperatura obteniendo valores de densidades muy cercanos a la densidad de diseño, lo cual ocasiona que tengamos mezclas asfálticas de alto desempeño.
- Menor porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compactada, con lo cual evitamos la oxidación del asfalto e incrementamos la densidad.
- facilidad para que la mezcla asfáltica sea transportada a grandes distancias de donde es producida.
- Facilidad para poder tolerar la incorporación de mezcla asfáltica reciclada.

En cuanto a los beneficios de utilizar mezclas tibias en el medio ambiente, cabe resaltar que al tener que calentar menos el asfalto para elaborar la mezcla

asfáltica ahorramos el consumo de combustible reduciendo las emisiones de diversos gases, siendo el principal el Dióxido de Carbono que es el responsable del calentamiento global. En Estados Unidos la producción aproximada de Dióxido de Carbono en las plantas de mezclas asfálticas en caliente es de aproximadamente 2.500 toneladas por año, con el uso de las mezclas asfálticas es posible reducir esta cantidad hasta 1.700 ton.

Por otra parte, entre los beneficios de utilizar mezclas tibias en las condiciones de trabajo, podemos señalar los siguientes:

- Reducción de los humos azules (componentes volátiles orgánicos) generados en la colocación de las mezclas asfálticas en caliente, con los cuales los trabajadores aspiran menos cantidades de los mismos.
- Menor consumo de combustible por parte de la maquinaria debido a que con menos esfuerzo se obtienen altos valores de densidades de la mezcla (Gandhi, 2008).

En la mayor parte de Europa y Estados Unidos se han utilizado una serie de tecnologías las cuales se mencionaron anteriormente, en éste trabajo se utiliza el crudo de palma como aditivo reductor de viscosidad y se investiga el potencial que tiene sobre la misma.

Se ha evidenciado que el crudo de palma que contenga buenas características de pureza y cumpla con los parámetros de control exigidos puede ser utilizado como reductor de viscosidad y por consiguiente se puede hacer una mezcla crudo de palma –asfalto, con el fin de producir mezclas asfálticas tibias.

Este trabajo se hizo en forma experimental en laboratorio logrando unos resultados satisfactorios en cuanto al desempeño de la mezcla asfáltica tibia comparada con las mezclas en caliente.

Con base en lo anterior se puede concluir que el crudo de palma es una opción viable para reducir la viscosidad del asfalto a menores temperaturas y se puede utilizar en la producción de mezclas asfálticas, además se puede incluir dentro de las técnicas utilizadas para tal objetivo.

PALABRAS CLAVES

Mezclas Asfálticas Tibias, viscosidad, temperatura, compactación, crudo de palma.

ABSTRACT

Increasing environmental awareness and stricter regulation of air emissions have led to development of production of warm mix asphalt (WMA).

The warm mix asphalt are those that occur at a lower temperature than hot mixes and aims to reduce the viscosity of the asphalt to achieve adequate wrapped aggregates and asphalt.

There are several technologies that provide this viscosity reduction at low temperatures, among others include: additive systems, foam-based systems, zeolites, technology LEA, double wrapped System, among others.

The benefits of warm mixes used in paving can be mentioned:

- Easy to compact using less effort and lower temperature density values obtained are very close to the design density, which causes us to have high-performance asphalt.
- Low percentage of voids in the compacted asphalt mixture, which prevents oxidation of asphalt and increased the density.
- Facility for the asphalt mix to be transported long distances from where it is

produced.

- Easy to tolerate the addition of recycled asphalt.

As for the benefits of using blends warm in the environment, it is worth noting that having less to heat the asphalt to produce asphalt mix fuel saved by reducing the emissions of various gases, the main Carbon Dioxide is responsible for global warming. In the U.S. the approximate production of carbon dioxide on plants of hot mix asphalt is approximately 2,500 tons per year, with the use of asphalt mixtures is possible to reduce this amount to 1,700 tons.

Moreover, the benefits of using blends in warm conditions, we note the following:

- Reduction of blue smoke (volatile organic compounds) generated in the placement of hot mix asphalt, with which workers aspire less of them.

- Lower fuel consumption by the machine because less effort is high density values obtained from the mixture (Gandhi, 2008).

In most of Europe and the United States have used a number of technologies which were mentioned earlier in this paper uses palm oil as an additive viscosity reducer and investigates the potential on it.

It has been shown that oil palm contains good characteristics of purity and meets the required control parameters can be used as a viscosity reducer and therefore can make a crude palm-mix asphalt to produce asphalt warm. This work was done on an experimental laboratory achieving satisfactory results in terms of performance compared to warm mix asphalt hot mixes.

Based on the foregoing it can be concluded that oil palm is a viable option to reduce the viscosity of asphalt at lower temperatures and can be used in the production of asphalt mixtures can also include in the techniques used for such

purpose.

KEYWORDS

Warm Asphalt Mix, viscosity, temperature, compaction, crude palm.

INTRODUCCIÓN

Las carreteras son esenciales para el bienestar de la humanidad, tanto en términos sociales como económicos, pero es innegable que su construcción, mantenimiento y uso tienen un impacto negativo en el ambiente. Para minimizar parte de esos impactos, la respuesta de los ingenieros ha sido la producción y aplicación de mezclas asfálticas a temperatura reducida. En esta línea, se ha desarrollado la técnica para producir las mezclas tibias, la cual explora las distintas opciones y su eficacia a la hora de reducir el impacto medioambiental en la construcción y mantenimiento de las carreteras pavimentadas.

Efectivamente, una mayor concientización acerca del necesario sostenimiento del medio ambiente aunado a las estrictas regulaciones de emisiones de gases por parte de los entes reguladores ha llevado a que se desarrollen nuevas técnicas para la producción de mezclas de asfalto tibio (WMA, Warm Mix Asphalt) con lo cual se busca reducir las altas temperaturas utilizadas en la producción de las mezclas en caliente (HMA, Hot Mix Asphalt). En este contexto, la Ingeniería Civil propone como principal innovación la utilización de mezclas asfálticas en “tibio”, con las cuales lo que se pretende es reducir las temperaturas de mezclado, compactación y viscosidad de la mezcla asfáltica.

Consciente de la importancia que para el equilibrio ambiental tiene la utilización de las mezclas de asfalto tibio, el presente trabajo de grado tiene como propósito diseñar y producir en laboratorio mezclas asfálticas tibias a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma.

Los beneficios esperados del proyecto se verían reflejados en la reducción del consumo de energía durante la producción de la mezcla asfáltica y la reducción de las emisiones tanto en la fase de producción como en la de colocación.

Un primer acercamiento al objeto de estudio, permite conocer de la existencia de varios métodos de prueba para la producción de este tipo de mezclas (WMA) estos métodos tienen como común denominador la reducción de la viscosidad del asfalto a una temperatura determinada, lo cual permite al agregado estar plenamente cubierto a temperaturas más bajas que en la producción de HMA.

Las investigaciones sobre WMA se han centrado mucho en la producción con varias tecnologías. En este trabajo se investiga el potencial del aceite crudo de palma como agente reductor de la viscosidad en el asfalto para posteriormente evaluar sus características de desempeño y compararlas con las de la mezcla en caliente (HMA).

El presente trabajo de investigación está dirigido a Ingenieros Civiles y empresas dedicadas al desarrollo y aplicación de mezclas asfálticas, así como a los contratistas de obras públicas interesados en preservar el medio ambiente mediante la utilización en las obras de materiales menos contaminantes.

La estructura de este trabajo se compone de seis apartados, de los cuales los primeros cinco están destinados al planteamiento del problema de investigación, la justificación, los objetivos que se persiguen con el trabajo llevado a cabo, el marco teórico y la metodología adoptada para la realización del mismo.

El sexto y último apartado está destinado a presentar los resultados de la investigación efectuada. Entre otras actividades desarrolladas en dicho apartado, se presenta la caracterización del asfalto Base, los resultados de la dosificación en laboratorio del Crudo de palma asfalto, la caracterización de los materiales

agregados de la mezcla y se presentan los resultados del estudio técnico para la mezcla asfáltica utilizando aceite de palma.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los principales problemas medioambientales que debe afrontar la humanidad en el siglo XXI es el del cambio climático, dicho cambio, se debe en gran medida a la emisión de gases que contribuyen a aumentar la temperatura ambiental, dentro de tales gases destaca el dióxido de carbono que es responsable del 80% de las emisiones totales; durante miles de años, las emisiones de dióxido de carbono se mantuvieron estables, sin embargo a aumentado mucho desde la Revolución Industrial pasando de 280 ppm en el año 1800 a 380 ppm. en la actualidad, esta evolución ha venido acompañada de un aumento de la temperatura media que ha pasado de 13,7°C a 14,4°C.

El impacto económico como consecuencia del calentamiento global es enorme, pues dicho fenómeno está asociado a una mayor frecuencia e intensidad de los desastres naturales y la pérdida de tierras debido al aumento del nivel de los océanos, así como a PIB no generado como consecuencia de la disminución en la producción agrícola, en tal sentido, se estima por ejemplo que el costo de la inacción frente al calentamiento global podría ascender al 8% del PIB por año en 2100.

Por lo anterior, desde la década de los ochenta se observa una importante tendencia hacia la investigación, desarrollo e innovación en productos, procesos y servicios, que generen sostenibilidad ambiental contribuyendo a la mitigación o a la adaptación frente al Cambio Climático como problema de naturaleza compleja. El sector transporte no ha escapado a esa tendencia, debido a que es uno de los sectores más contaminantes pues representa el 40% de las emisiones totales de CO₂ de origen energético y un 80% de las de CO, siendo además la primera fuente de contaminación ambiental en el medio urbano.

Ante el atraso en el desarrollo vial de algunos países como Colombia, el mal estado en que se encuentran las vías, la poca duración de la carpeta de rodamiento en los pavimentos flexibles; es necesario buscar alternativas que minimicen las fallas de éstos pavimentos, en función de la disminución de costos económicos y ambientales.

La mezcla asfáltica es un material para construcción de pavimentos, compuesto por asfalto y un agregado mineral. El asfalto actúa como un agente ligante y aglutinador de las partículas minerales, formando una masa cohesiva muy efectiva, por lo que resulta un material muy atractivo para construir carpetas de rodadura.

Sin embargo, los procesos de mezclado y compactación empleados en las Mezclas Asfálticas en Caliente requieren altas temperaturas, por lo que la emisión de gases contaminantes es elevada para el proceso productivo, haciéndolo costoso y causante de un grave daño ambiental. Como solución, se han desarrollado algunas tecnologías destinadas a la disminución de la temperatura mediante la reducción de viscosidad de los ligantes asfálticos. De esta manera, se han concebido las Mezclas Asfálticas Tibias (WMA – Warm Mix Asphalts) que además de generar ahorros en el consumo de combustible durante las operaciones de mezclado y compactación, reducen la emisión de los gases que se forman durante la producción y aplicación de la mezcla asfáltica.

Es precisamente en la industria de fabricación de mezclas asfálticas donde se ha observado un interés significativo en la producción de mezclas a temperaturas más bajas. Los avances en la tecnología, junto con las crecientes preocupaciones medioambientales y de seguridad ocupacional han orientado las investigaciones por la senda de una producción más respetuosa del medio ambiente.

La reducción de la calefacción de producción de la mezcla, no sólo involucra un menor consumo de combustible, sino también, significativas reducciones en la cantidad de emisiones de partículas de los agregados finos, en la cantidad de gases de efecto invernadero generados, en la cantidad de humo generada por el betún, lo cual es especialmente relevante en torno a las máquinas de pavimentación, y por ende la reducción en la cantidad de combustibles fósiles no renovables utilizados.

La mayoría de los pavimentos de hoy en día se realizan con mezcla, que consta de asfalto y agregados minerales. El agregado es generalmente una mezcla de agregado grueso, agregado fino y llenante mineral. Los agregados y asfalto en caliente se mezclan normalmente entre 150 y 180 ° C y para su compactado se recomiendan temperaturas entre 130 y 150 ° C.

El asfalto y los agregados se calientan a una temperatura alta, para garantizar una viscosidad adecuada, capaz de cubrir las partículas de agregado. El asfalto se compacta, cuando aún está caliente, lo cual hace optimizar su desempeño. A medida que el asfalto se enfría, se vuelve más difícil de compactar, disminuyendo sus características de viabilidad en cuanto al cumplimiento de las especificaciones.

La problemática que se ha planteado relativa a las dificultades técnicas, los mayores costos y el impacto ambiental de las mezclas asfálticas en caliente (HMA) dan pie para que se formule como principal pretensión de este trabajo la de producir mezclas asfálticas (WAM) a baja temperatura, empleando un bioinsumo disponible en Colombia, como es el aceite crudo de Palma. En tal sentido, la pregunta problema que se pretende responder con este trabajo es: ¿Cómo lograr el diseño de mezclas asfálticas tibias, mediante la mezcla del asfalto base y aceite crudo de Palma que sirvan para reducir la temperatura de producción de la mezcla y la viscosidad del asfalto?

2. JUSTIFICACIÓN

Los egresados de las universidades tienen el compromiso de asumir con responsabilidad el reto de contribuir a mejorar las condiciones medioambientales a partir del conocimiento adquirido en la academia, en este sentido, ya no se trata solamente de ser socialmente responsables, sino también, de asumir con la mejor disposición la responsabilidad ambiental que a cada uno desde su órbita profesional le compete. El reto es grande, pues se trata de compaginar el progreso de la humanidad y el mejoramiento de las condiciones de vida, con el deber de preservar los recursos naturales que hoy se tienen, para el disfrute de las generaciones futuras.

En el quehacer profesional de la Ingeniería Civil, son reiteradas las inquietudes que se generan en los proyectos de pavimentación de mallas viales relacionadas con la mejor forma de reducir costos en la materia prima, en la producción y en el desecho de materiales, a esta situación, se suma la imperiosa necesidad ética, legal y ambiental, de ayudar a la sostenibilidad del ambiente a través de la implementación de alternativas que contribuyan a la minimización de impactos ambientales negativos.

A partir de ello, el fundamento del presente trabajo gira en torno a una solución para la producción de mezclas asfálticas, de forma tal que reduzca el uso de alta calefacción aplicada sobre la mezcla para la adhesión de partículas, y con ello, disminuya significativamente, el uso de combustibles fósiles para alimentar dicho sistema de calefacción.

Cabe recordar que en la actualidad la oferta en soluciones para la producción de mezclas asfálticas en el país, se limita únicamente a las mezclas en caliente, entre

tanto, las firmas de pavimentación nacionales, no identifican la necesidad de invertir en proyectos de investigación, desarrollo e innovación para la implementación de nuevas tecnologías asfálticas, de ahí la importancia del presente proyecto de investigación.

Desde la perspectiva medioambiental, la realización del proyecto de investigación que se plantea es relevante y está plenamente justificado, pues se identifica con una necesidad surgida en el seno de la sociedad actual, donde lo que se busca es brindar soluciones que además de mejorar las condiciones de vida de los usuarios y reducir costos, prevengan o por lo menos minimicen el deterioro medioambiental.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar mezclas asfálticas tibias, a partir de bioasfalto, el cual se produce con la mezcla del asfalto base y aceite crudo de Palma buscando reducir la temperatura de producción de la mezcla y la viscosidad del asfalto.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar bioasfalto a partir de la mezcla de aceite crudo de Palma y asfalto base, definiendo las proporciones que satisfagan las normas estipuladas por INVIAS en 2007, para la producción de mezcla asfáltica.
- Elaborar el diseño procedimental para la producción de la mezcla asfáltica, de acuerdo al Método Marshall, y a la caracterización precisa de materiales asfálticos y pétreos, aplicados a una mezcla asfáltica tipo semidensa 2 (MSC-2).
- Establecer una comparación que permita la evaluación de desempeño en el laboratorio, entre las mezclas asfálticas tibias con bioasfaltos a partir de aceite crudo de Palma y las mezclas asfálticas producidas en caliente.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ANTECEDENTES

Constantemente salen al mercado nuevos productos y procesos que buscan mejorar el impacto ambiental que produce la construcción de carreteras, en aras de generar mecanismos de construcción de vías, con mínimos impactos ambientales, y que consoliden una industria “verde”.

Recientemente la industria de la construcción, se ha enfocado en la reducción de las temperaturas en la producción y aplicación de las mezclas asfálticas. Típicamente la producción y aplicación de mezclas en caliente requiere que los materiales se calienten entre 135°C y 180°C.

La temperatura viene dictada por parte de la viscosidad del ligante asfáltico, siendo necesario aplicar calefacción para garantizar un revestimiento homogéneo y completo de los agregados por parte del asfalto. Dichas limitaciones, deberán tomarse en cuenta a la hora de considerar las posibilidades de reducir las temperaturas de producción y aplicación; junto con la necesidad de garantizar las propiedades mecánicas del nuevo pavimento inmediatamente después de la terminación de la obra, para reducir a su mínima expresión, los riesgos y la interrupción del tránsito. La clave está en la difusión del ligante por el esqueleto mineral de los agregados. Ante este panorama, se han introducido varias opciones para lograr dichos objetivos de reducción, aplicando temperaturas significativamente reducidas, como se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 1. Reducciones en las temperaturas para obtener mezclas asfálticas mediante diferentes métodos

Proceso de Mezclas asfálticas tibias	Compañía	Aditivos	Temperatura de Producción (en planta) °C	Reporte de uso	Aproximado Total Toneladas producidas a la fecha
ADITIVOS- CERAS					
Sasobit (Fischer-Tropsch cera)	Sasol	Si, en Alemania añadieron un promedio 2.5	Variados, 1 20°C–130°C	Alemania y Otros países Por todo el mundo	>10 millones de toneladas por todo el mundo
Asfalto -B (Montan cera)	Romonta	Si, en Alemania añadieron un promedio de 2.5% a peso	Variados, 115°C–135°C	Alemania	Desconocido
Licomont BS 100 (aditivo) o Sübit (ácido adiposo amidas)	Clariant	Si, alrededor de 3% del peso	Variados, 115°C–135°C	Alemania	>322.500 metros cuadrados desde 1994
3E LT or Ecoflex(proprietario)	Colas	Si 2% del peso	Variados, 115°C–135°C	Francia	Desconocidos
PROCESO ESPUMADO					
Aspha-min (zeolite)	Eurovia y MHI	Si, alrededor de 0.3% en peso total de la mezcla	Entre 110°C y 135°C	Alemania, Francia y Estados Unidos	Alrededor de 300,000 toneladas
ECOMAC (mezcla fría antes de echarla)	Screg	Si (tipo y calidad desconocida)	Situado alrededor de 45°C (113°F)	Francia	Algunas pruebas
LEA, también EBE y EBT (espumoso De una porción de fracción agregada)	LEACO, Fairco, y EIFFAGE Travaux Publics	Si, 0.2% en peso de archivador de capa y agente de adhesión	<100°C	Francia, España, Italia y estados Unidos	>100,000 toneladas
LEAB® (espuma directa con aditivo archivador)	BAM	Si, añadieron un 0.1% en peso	90°C (194°F)	Países Bajos	Siete proyectos comerciales
Proceso de espuma					

Proceso de Mezclas asfálticas tibias	Compañía	Aditivos	Temperatura de Producción (en planta) °C	Reporte de uso	Aproximado Total Toneladas producidas a la fecha
LT Asfalto (asfalto espumoso con adicción de Higroscopio) pasta de relleno para mantener funcionalidad	Nynas	Si, añadieron 0.5-1.0% de una pasta de relleno de Higroscopia	90°C	Países bajos e Italia	Desconocido
Mezclas tibias de asfalto espumoso	Kolo Veidekke, Shell Bitumen (Derechos patentes por todo el mundo excepto U.S.), y BP (derechos patentes U.S.)	Inyeccion de agua alta presion	110-120°	Francia, noruega, también Canadá, Italia, Luxemburgo, países bajos, Suecia, Suiza y reino unido	>60,000 toneladas
Aparición de tecnologías de Estados Unidos					
Evotherm™ (agregado caliente cubierto con emulsión)	Mead- Westvaco	Si	85-115 C	Francia, también Canadá y , China, Suráfrica y Estados Unidos	> 17,000 toneladaos
Doble- Barrel Green	Astec	Inyeccion de agua a presión vaporizada	116-135 °C	Estados Unidos	>4,000 toneladas
Advera (zeolite)	PQ Corporation	Si, alrededor de 0.25%de peso total de la mezcla	Variados,1 20°C–130°C	Estados Unidos	>10,000 toneladas

Fuente: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2008

4.1.1 Las mezclas tibias. Las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C , su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales

es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas bituminosas en caliente.

El desarrollo de esta tecnología con enfoque en la reducción de temperatura de mezcla y compactación empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kyoto. La alternativa también facilita el trabajo de pavimentación en los países en los que el invierno es muy riguroso, una vez que la mezcla tibia enfría más lentamente que la mezcla en caliente.

En 2002, especialistas de los Estados Unidos empezaron a investigar esta técnica, que rápidamente sería adoptada por ese país. En Brasil, se empezó a investigar la tecnología, adaptándola para las condiciones de trabajo locales.

4.1.2 Antecedentes cronológicos en el trabajo con Mezclas Tibias (WMA). Los antecedentes cronológicos en el trabajo con mezclas tibias se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Antecedentes cronológicos de la producción de mezclas tibias WMA

AÑO	ANTECEDENTE
1995	En 1995, Shell y Kolo Viedekke, iniciaron un programa en conjunto, para el desarrollo de un producto, y del proceso para la fabricación de mezcla agregado - asfalto a temperaturas más bajas; obteniendo mejores propiedades o equivalentes condiciones de desempeño, con relación a las mezclas tradicionales en caliente.
1999-2001	Reportes iniciales de las tecnologías de la mezcla tibia en el Congreso Eurasphalt/Eurobitume, el Fórum Alemán de Bitumen, Conferencia sobre Pavimentos Asfálticos en Sudáfrica, principalmente.
2002	Recorrido de exploración a Dinamarca, Alemania y Noruega realizado por directores de NAPA para examinar las tecnologías de la mezcla asfáltica tibia (WMA), Aspha-min, la Espuma y el Sasobit. En la agenda de trabajo del grupo, se incluyeron

AÑO	ANTECEDENTE
	reuniones con el Fórum Alemán de Bitumen, con el objetivo de considerar algunas actividades del grupo de Trabajo sobre Reducción de Temperatura.
2003	Los estudios sobre mezclas tibias, son presentados en la Convención Anual de la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico NAPA.
2003	El Centro Nacional para la Tecnología en Asfalto, investiga sobre los procesos de las mezclas tibias, Alpha-min (zeolite cristalino) y Sasobit (una cera de Fsher-Tropsch). La investigación es patrocinada por NAPA, Administración Federal de Carreteras FHWA, Eurovia (Aspha-min) y Sasol (Sasobit).
2004	Meadwestva company, introduce Evothem DAT (aditivo químico) a la mezcla, al tiempo que apoya la investigación de NCAT.
2004	La demostración de mezclas tibias, es presentada en el Mundo del Asfalto.
2004	Las primeras pruebas de campo fueron realizadas en Florida y Carolina del Norte
2005	Formación del grupo de trabajo (TWG) de la mezcla Asfáltica Tibia de NAPA-FHWA. El objetivo principal del trabajo es la implementación adecuada a través de recolección de datos y análisis, de un método genérico de especificaciones técnicas en WMA.
2005	Declaración de investigación de problemas sometido a la consideración de la American Association of State Highway and Transportation Officials ,AASHTO.
2005	Se realizan pruebas de campo en Florida, Indiana, Maryland, New Hampshire, Ohio; y en Canadá.
2005	La NCAT, publica sus primeros reportes sobre Sasobit y Aspha-min.
2006	Durante la Conferencia de Pavimento Asfáltico en el Mundo del Asfalto, se presenta una sesión de medio día sobre mezclas tibias
2006	Grupo de Trabajo Técnico TWG, publica lineamientos sobre el funcionamiento y pruebas ambientales.
2006	Con base en la declaración de investigación de problemas, cuyo documento fue sometido en 2005 a evaluación por parte de la AASHTO, se define como de alta prioridad la destinación de fondos de la investigación en WMA.
2006	El TWG, somete dos declaraciones más de investigación, a consideración por parte de la AASHTO.
2006	Se realizan pruebas de campo en: California, con la mezcla de hule asfáltico; Michigan, Missouri, sobre la nueva aplicación para evitar baches causados por temperatura en la carretera; Nueva York, donde se probó el nuevo proceso de Asfalto de bajo consumo de energía; Ohio, donde se realizó una exhibición abierta al público con 225 asistentes; Carolina del Sur, Texas, Virginia y Wisconsin, también se realizaron exhibiciones abiertas al público.
2006	Un contratista de Missouri, realiza trabajos de producción de pavimento con mezcla en tibio partiendo de una prueba exitosa.
2006	NCAT publica un reporte sobre el Evothem.
2006	Para la realización de la Conferencia Anual de NAPA, fueron requeridas numerosas presentaciones
2007	AASHTO y FHWA, realiza visitas guiadas a experiencias en WMA, en Francia, Alemania y Noruega.
2007	La sesión de trabajo de 2007, del Grupo en Investigación de Transporte TRB, tuvo como único tema WMA
2007	Astec Industries introduce su tecnología de asfalto espumado.
2007	Meadwestva company, presenta el sistema de introducción de la Tecnología del Asfalto Dispersado (DAT) para el Evothem.
2007	Se desarrolla, Advera WMA, un producto a partir de Zeolite, introducido por PQ Corporation.

AÑO	ANTECEDENTE
2007	Demostración en calle de San Antonio en la Reunión Anual de la APWA.
2007	<p>30.000 toneladas de diferentes tecnologías de WMA, son colocadas cerca de Yellowstone, para el mes de Agosto.</p> <p>En las pruebas realizadas en la Yellowstone, se utilizaron 9,000 toneladas métricas de asfalto, en cada una de las tres secciones (Sección de Control, Sección Sasobit y Sección de Advere WMA). Durante el proceso de acarreo, las mezclas fueron conducidas cerca de 90 minutos desde una planta portátil en Cody, Wyo.</p> <p>Aunque fue difícil la logística, las cuadrillas de pavimentación lograron buenas densidades: el promedio de Advere WMA-93.9% de densidad teórica máxima; el promedio de Sasobit – 93.4%. Neitke, quien estuvo a cargo del proyecto, declaró que: “La densidad no fue difícil de alcanzar, aun cuando las temperaturas de la mezcla bajan”, ante lo cual, “Parecía un tanto difícil mantener bajas las temperaturas de la mezcla; las temperaturas de producción tenían una tendencia a brincar de 120 a 127°C. Las pruebas mostraron que los agregados se secaron adecuadamente aun con las temperaturas bajas. Los contenidos de humedad estaban abajo del máximo de 0.5% tanto para las mezclas en tibio como para la mezcla de control”.</p>
2007	Son realizadas numerosas pruebas de campo, en California, Illinois, Nueva Jersey, Nueva York, Carolina del Norte, Ohio, Carolina del Sur, Tennessee, Texas, Virginia, Wisconsin, Wyoming y otros estados; y en Ontario.

Fuente: Revista HMAT, 2008.

4.2 BENEFICIOS DE LA MEZCLA TIBIA

4.2.1 Consumo de energía. La reducción del consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas tibias y es discutido en la literatura como uno de los dos principales beneficios de ésta.

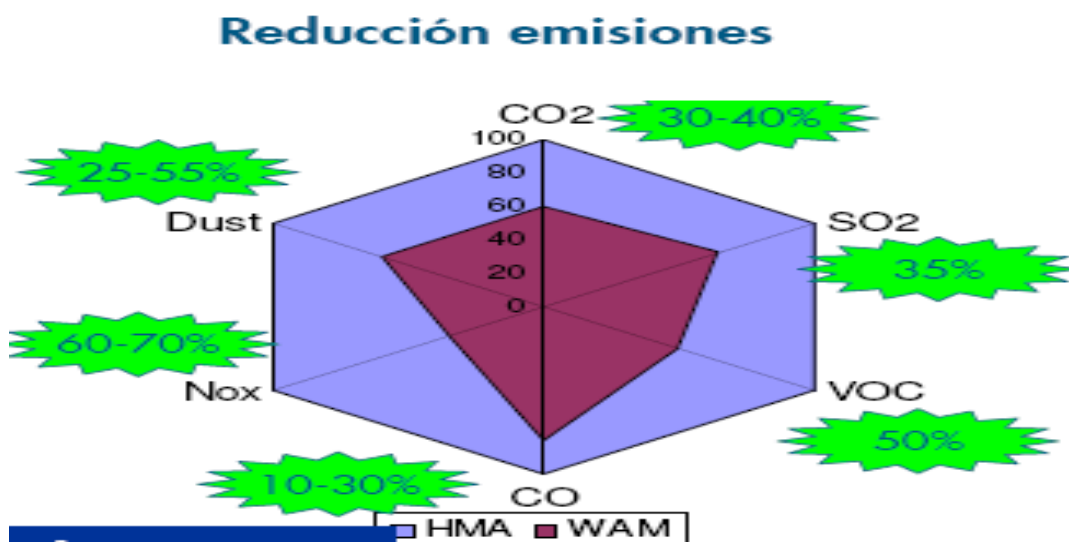
Los estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía de alrededor de 30% se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía reduce a su vez el costo de la producción de la mezcla, pero puede haber también un añadido por reducción en los costos involucrados en el uso del proceso de mezcla tibia, es decir, para los aditivos y/o equipos de modificación.

Otro beneficio adicional de la reducción de las temperaturas de producción que a veces se menciona es el menor desgaste de la planta de asfalto.

4.2.2 Emisiones. Otra de las ventajas de la mezcla tibia es la reducción de las emisiones debido a la reducida temperatura de producción. De acuerdo a la literatura, la producción de mezcla tibia reduce significativamente las emisiones de gas carbónico y los olores, en comparación con la producción de mezclas en caliente.

Cabe recordar que las emisiones de producción de mezcla - asfalto y la colocación pueden, en ciertos niveles elevados, ser perjudiciales para la salud. En 2000, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EE.UU. publicó un estudio de riesgo sobre los efectos en la Salud Ocupacional de la exposición a la mezcla- asfalto. En esta revisión, el NIOSH evaluó los efectos potenciales para la salud de la exposición ocupacional a asfalto. En 1977, el NIOSH determinó que entre los efectos adversos para la salud por la exposición se encuentran la irritación de las membranas de la conjuntiva y el tracto respiratorio.

Figura 1. Reducciones registradas en las emisiones de planta en la producción de mezcla



Según se puede apreciar en la figura 1 las mezclas asfálticas tibias (WMA) presentan unas reducciones importantes con respecto a las mezclas asfálticas en caliente (HMA) en cuanto a las emisiones, así por ejemplo, con las mezclas WMA se pueden lograr reducciones entre el 25 y 55% en las partículas de polvo, entre 30% y 40% en las emisiones de gas carbónico, entre 60% y 70% en las de óxido de nitrógeno, 50% en compuestos orgánicos volátiles y 35% en las emisiones de dióxido de azufre.

4.2.3 Viscosidad. La funcionalidad de las tecnologías de WMA se basa en la reducción de la viscosidad del asfalto.

La viscosidad reducida permite al agregado ser totalmente cubierto a una temperatura inferior a lo que tradicionalmente se requiere en las mezclas de producción en caliente.

Debido a la viscosidad reducida, los procesos de mezcla tibia pueden funcionar como una ayuda en la compactación y algunos beneficios relacionados con este son mencionados a menudo en relación con este tipo de mezclas.

4.2.4 Técnicos. Producción, colocación y compactación a temperaturas más frías, lo cual genera un control de densidades más eficaz.

Aumento en las distancias de transporte, dado que por la menor temperatura de producción hay una mayor conservación de la energía de compactación de los equipos, por tanto se requiere menos esfuerzo para obtener las densidades requeridas, en otras palabras, los menores requerimientos de temperatura para la compactación de la mezcla, agilizan el trabajo aumentando las distancias de cobertura de la mezcla asfáltica lo que se traduce en una disminución de los costos.

Se puede incorporar además un mayor porcentaje de RAP (reciclaje de pavimentos asfálticos) debido a las bajas temperaturas.

Se puede lograr también una apertura al tráfico en menor tiempo comparado con las mezclas en caliente y obtener una menor oxidación en el asfalto por los gradientes de temperatura.

4.3 ESTUDIOS COMPARATIVOS SOBRE LAS VENTAJAS DE LAS MEZCLAS TIBIAS

4.3.1 Emisiones y exposición laboral a temperaturas inferiores de producción y extensión de mezclas asfálticas. Es bien sabido que la reducción de las temperaturas de producción de mezclas asfálticas presenta ventajas ambientales importantes sobre las emisiones, exposiciones laborales y consumo de energía. La industria de las mezclas asfálticas en caliente conoce esto desde hace muchos años. El mayor reto, sin embargo, ha sido siempre conseguir una calidad adecuada de las mismas a temperaturas de operación inferiores ó a temperatura ambiente.

En los últimos años, nuevos procesos de producción a temperaturas comprendidas entre 80 y 135°C han atraído gran interés debido a la posibilidad de aproximarse o incluso alcanzar la calidad de la mezcla en caliente y lograr reducciones en el consumo de energía, las emisiones y la exposición laboral.

En tal sentido, fue llevado a cabo un estudio por funcionarios de Shell Bitumen el cual se realizó los días 25 y 27 de octubre de 2006 en Florencia en una planta mezcladora que se había modificado para producir asfalto de acuerdo con el proceso WAM Foam. El betún duro utilizado para WAM era un grado de penetración 20/30 (EN12591) y el betún flexible era un grado V10000 (EN12591).

Los objetivos del estudio fueron los siguientes:

- _ Determinar las exposiciones personales para aplicaciones para el contratista de carreteras Conglobit. utiliza el proceso WAM Foam para producir y extender mezclas asfálticas bajo el nombre "Greenfalt".
- _ Comparar, en condiciones de exposición en campo, el tipo de emisiones utilizando Greenfalt con las producidas utilizando HMA (mezcla en caliente convencional).
- _ Recoger y comparar los valores de emisión de las operaciones de mezcla en la planta de asfalto durante la producción de WAM y HMA.

Las exposiciones a material constituido por partículas se determinaron y compararon con los Límites de Exposición Laboral (OEL) italianos para humos de betún (betún de petróleo número CAS 8052-42-4). Algunos países, tales como Italia en 2003, han adoptado las recomendaciones de la Conferencia Americana de Sanitarios Industriales del Gobierno (ACGIH) en la legislación nacional. En enero de 2000, ACGIH modificó sus límites de exposición recomendados (REL) para humos de betún. El límite era 5 mg/m³ medido como aerosoles totales (minerales y orgánicos). El último valor REL es 0,5 mg/m³, medido como aerosol soluble en benceno de la fracción inhalable, es decir la fracción orgánica de los aerosoles totales. Los aerosoles totales se miden utilizando una casete de 37 mm de caras cerradas equipada con un filtro de PTFE, que es un toma muestras de "aerosol total" (fracción respirable). Los aerosoles orgánicos totales se extraen y se cuantifican luego (Fracción Soluble en Benceno o BSF). Obsérvese que la fracción inhalable se considera como similar a BSF para este trabajo. Las duraciones de toma de muestras para HMA y WAM estaban comprendidas entre 3 y 4 horas, lo que se adoptó a fin de obtener una cantidad mayor que la mínima (BSF > 0,1 mg/m³) requerida por NIOSH 5042. Las posiciones en las cuales fueron ubicadas las tomas muestras fueron las siguientes:

- _ Dos toma muestras próximas a la amasadora; debido a la saturación observada de los filtros en el caso de la producción de mezcla en caliente, se añadió un tercer filtro con un tiempo de toma de muestras de 60 minutos. No se observó saturación alguna en el caso de WAM Foam.
- _ Dos toma muestras situados en el extremo superior de las tolvas de descarga.
- _ Uno o más toma muestras en el punto de descarga.
- _ Toma muestras estático, aproximadamente a 50 m de distancia de la planta mezcladora.

El 26 de octubre, el trabajo de pavimentación implicaba la construcción de una capa estructural utilizando Greenfalt. Se extendió en el lugar una cantidad de 870 toneladas de Greenfalt con una longitud de 1.300 m, 3,5 m de anchura y con espesores de 90, 50 y 90 mm para las tres secciones de esta capa.

Las temperaturas del aire registradas eran 19°C por la mañana y 30°C a las 3 de la tarde. El estado del tiempo era nublado, sin viento. La duración de la toma de muestras por el personal de pavimentación fue aproximadamente 400 minutos. La toma de muestras para las medidas de exposición se realizó para los puestos de trabajo Siguientes:

- _ Un conductor de la terminadora.
- _ Dos operarios de la plantilla maestra.
- _ Un obrero/rastrillador experto.
- _ Un conductor de la Compactadora.

Se utilizaron bombas personales para la toma de muestras de humos con un caudal de 2 l/min. El material se recogió sobre filtros (2 µm) dispuestos en el casete estándar de 37 mm.

- _ Aerosoles totales, lo que representa los aerosoles minerales y orgánicos.

_ BSF extraído del filtro con benceno, lo que representa los aerosoles orgánicos totales (la parte restante se considera como la fracción mineral o MF).

Se tomaron también dos muestras estáticas a fin de abarcar el área total del lugar de trabajo en la carretera y comprobar si existían fuentes de aerosoles distintas del tren de extensión.

Durante todo el día de la toma de muestras, debió observarse la ausencia de humos (visual y olfativa) durante la extensión de la mezcla de asfalto en caliente Únicamente se apreció algo de vapor de agua procedente del agua utilizada para la compactadora.

Las casetes de filtro estándar de 37 mm se utilizaron en serie con tubos adsorbentes a fin de recoger la fracción de vapores (gases). El adsorbente adecuado utilizado para atrapar los compuestos volátiles es XAD-2 con secciones adsorbentes anterior y posterior. Las secciones anterior y posterior se extrajeron por separado utilizando dicloro metano para comprobar la ruptura. El análisis y las cuantificaciones fueron realizados por medio de cromatografía de gases con detección por ionización de llama (GCFID).

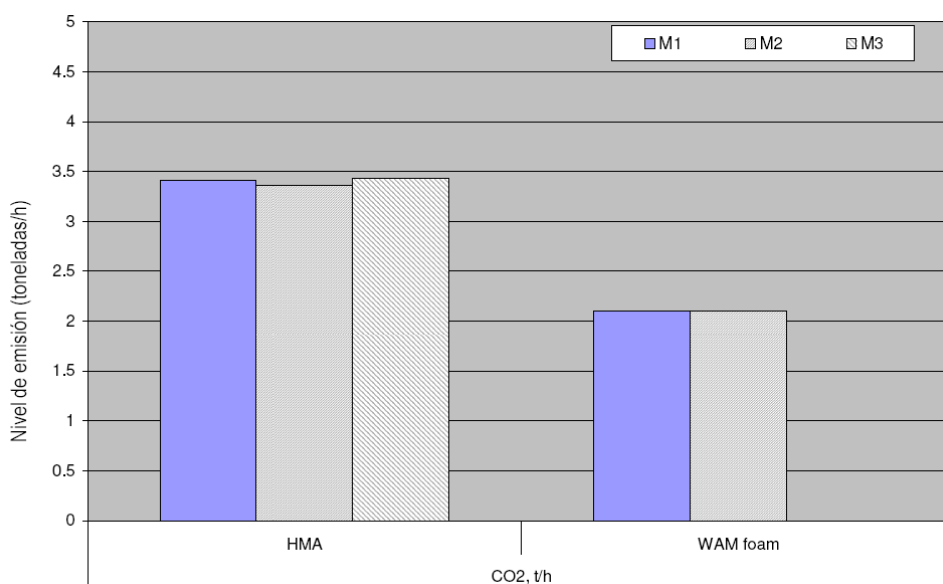
La determinación y cuantificación de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH) en las fracciones solubles en benceno se realizaron sobre los toma muestras de HMA. Esto no se ha hecho en el caso de WAM, dado que la cantidad de materia orgánica recogida era demasiado pequeña para dicho análisis. La identificación de los compuestos está Filtro Adsorbente Bomba La ausencia de humos durante la extensión de WAM 5/10 basada en los 16 compuestos de prioridad mencionados en la lista de EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). El análisis de PAH se realizó de acuerdo con el método Shell AMS 1057-1 elaborado por la propia empresa (basado en el método 610-EPA para

aguas residuales). Los PAH se extrajeron con THF a partir de la parte orgánica de las materias particuladas recogidas (BSF) y se analizaron por HPLC-UV.

- **Resultados del consumo de combustible en la planta de asfalto.** El consumo de combustible (gas) se midió a diferentes niveles de capacidad de producción de la planta en el intervalo de 60-100%. Los resultados mostraron una reducción en el consumo de combustible de un 35%.

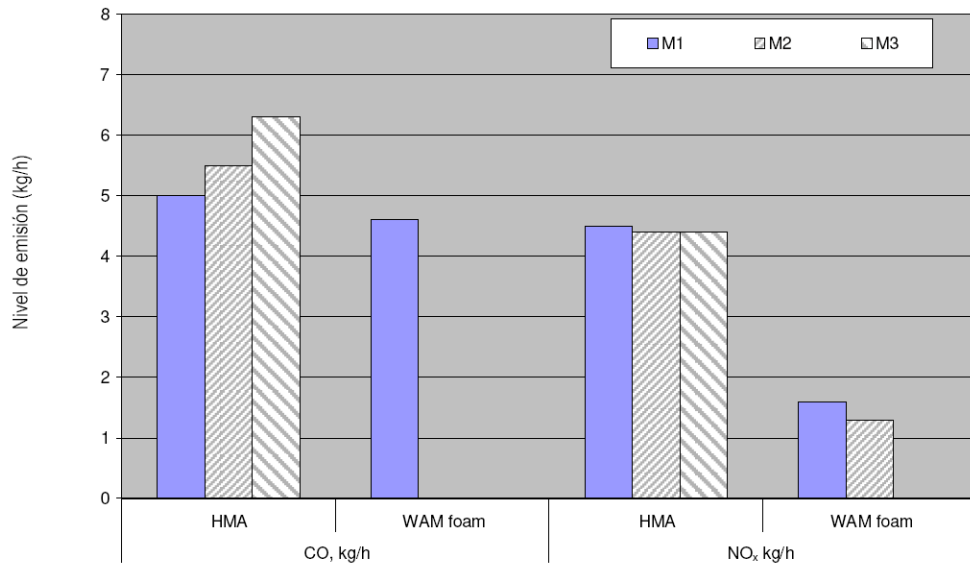
Los resultados de emisiones de gas y polvo por la chimenea durante la producción de mezcla asfáltica para el trabajo de pavimentación en la autopista Florencia-Pisa-Livorno en Italia, fueron medidos por Det Norske Veritas AS varios contaminantes del aire (CO₂, CO, NO_x, SO₂, TOC y polvo) emitidos por la chimenea de la planta mezcladora.

Figura 2. Niveles de emisión de CO₂ en tres momentos de medida en la planta de asfalto



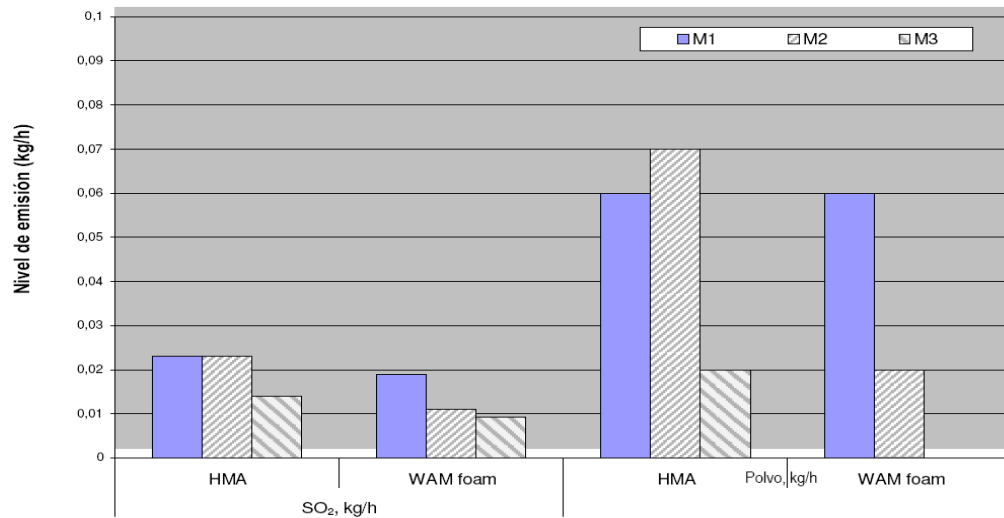
Se muestra la emisión de CO₂ en toneladas por hora y la reducción de las emisiones alcanzada es aproximadamente de un 35%.

Figura 3. Niveles de emisión de CO y NOx en tres momentos de medida en la planta de asfalto



Las reducciones de CO alcanzadas fueron aproximadamente de un 8% y la reducción de NOx fue aproximadamente de un 60%.

Figura 4. Niveles de emisión de SO2 y polvo en tres momentos de medida en la planta de asfalto

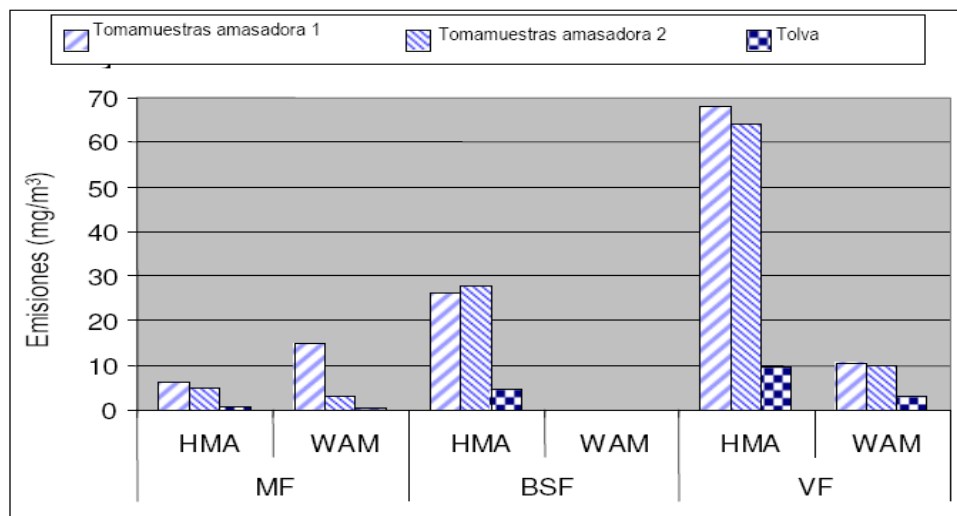


Los niveles de emisión de SO2 y polvo son bajos, pero pueden obtenerse todavía reducciones del orden del 25 al 30%.

En las figuras 2, 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos para un ritmo de producción de 140 toneladas de mezcla por hora. La disminución de las temperaturas de operación desde 180°C en la producción de mezcla caliente a aproximadamente 125-130°C en la producción de mezcla de asfalto templada produjo una reducción considerable en la cantidad de emisiones de gas y polvo.

- **Resultados acerca de las emisiones en la planta de asfalto.** Se llevó a cabo un primer estudio de emisiones en una planta mezcladora en el año 2000, este estudio es el más extenso en una planta de este tipo. Los resultados (en mg/m³) se presentan en la Figura 5, en la cual MF indica la fracción mineral, BSF la fracción soluble en benceno y VF la fracción volátil.

Figura 5. Emisiones en la planta asfaltadora



Se aprecia que la descarga de la amasadora es el punto en el que se emiten más humos.

- _ La fracción mineral (MF) se encontró similar.
- _ La fracción orgánica (BSF) se encontró notablemente mayor para HMA (hasta 200 veces mayor). Los aerosoles orgánicos representan una pequeña parte de las

emisiones totales para WAM al contrario que HMA (hasta el 4% y el 90% respectivamente).

_ La fracción volátil (VF) se encontró mayor para HMA (hasta 6 veces mayor). Debido al nivel muy bajo de BSF emitida con WAM, las fracciones volátiles pueden representar casi la totalidad de las emisiones orgánicas (hasta el 99%).

• **Resultados en cuanto a las medidas de exposición en el lugar de pavimentación.** Los valores de exposición (corregidos por ensayo en blanco de campo) se dan en la Tabla 3. Se trata de valores Medios Ponderados por Tiempo (TWA) de 8 horas. Los valores TWA de 8 horas corresponden a la exposición media a lo largo de un turno de trabajo de 8 horas. Este valor es preferido en muchos casos dado que es más representativo de un día de trabajo total.

Tabla 3. Valores de exposición

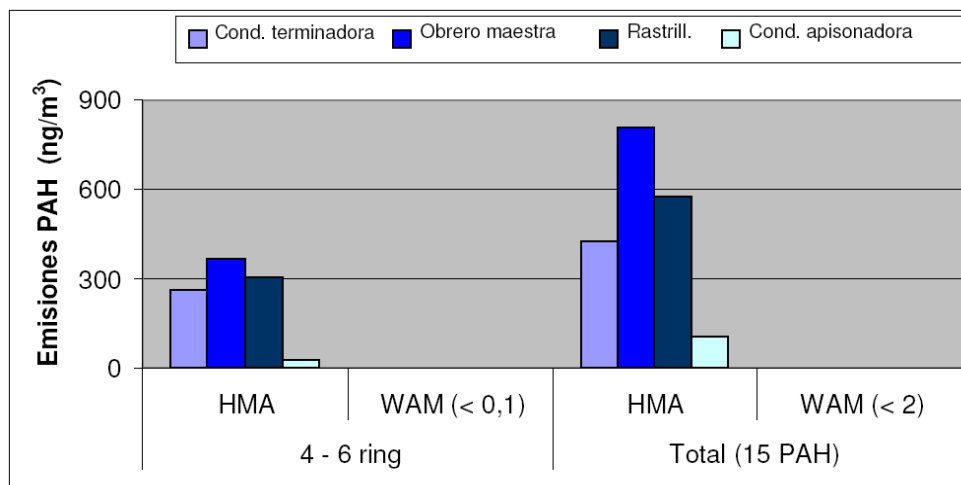
TWA de 8 h en mg/m ³	Extensión WAM (día 2)		
	MF	BSF	SV
Conductor de la asphaltadora	0,22	0,05	3,45
Obrero de la maestra 1	0,19	0,08	2,40
Obrero de la maestra 2	0,19	0,07	1,18
Rastrillador	0,16	0,14	2,93
Conductor de la apisonadora	0,13	0,03	0,79
Estático 1	0,97	0,02	0,32
Estático 2	0,14	0,01	0,23

La parte principal de los aerosoles es inorgánica (polvo mineral). Los datos de exposición relevantes (BSF) han sido comparados con los valores OEL italianos. Sobre una base de Media Ponderada por Tiempo de 8 h, ninguno de los valores medidos excedía de estos OEL. Debe entenderse que en todos los casos (producción en caliente y templada) los valores determinados son muy inferiores a cualquier exposición laboral o límite ambiental. Esto demuestra claramente que tanto la producción de mezcla en caliente como la WAM-Foam son plenamente

aceptables desde un punto de vista laboral y ambiental. Cuando se comparan con las medidas de exposición previas de Shell conducidas sobre la pavimentación HMA, estas emisiones se encuentran en el rango inferior (comúnmente 0,05-0,60 mg/m³ en BSF). El mismo nivel de magnitud (< 0,05) se registró anteriormente cuando se utilizaron ligantes de grado de penetración usuales (v.g. 35/50) a aproximadamente 150°C. Los datos de BSF son también consistentes con los datos de exposición de los estudios anteriores de la Compañía (hasta 0,05 mg/m³). Los valores estáticos se encontraron más bien elevados, especialmente en términos de polvo mineral. Esto se explica probablemente por el tráfico al otro lado de la autopista.

- **PAH en BSF.** Las concentraciones de PAH son los valores sumados para los BSF y los VF. Los resultados del análisis se presentan en la Figura 6 y los valores se expresan en ng/m³. Se presenta la suma de los compuestos de 4-6 anillos y la suma de 15 PAH detectados. Los resultados son consistentes con los valores BSF: cuanto mayor es la fracción orgánica, tanto más alto es el contenido de PAH. Los valores para la mezcla caliente presentados en la Figura son valores típicos derivados de medidas de exposición previas realizadas por Shell.

Figura 6. Emisiones PAH según resultados del estudio



El estudio llevado a cabo por Shell Bitumen muestra que en la producción de mezclas asfálticas, la tecnología WAM Foam es significativamente más respetuosa con el medio ambiente en términos de emisiones de CO₂, NO_x, polvo y aerosol orgánico.

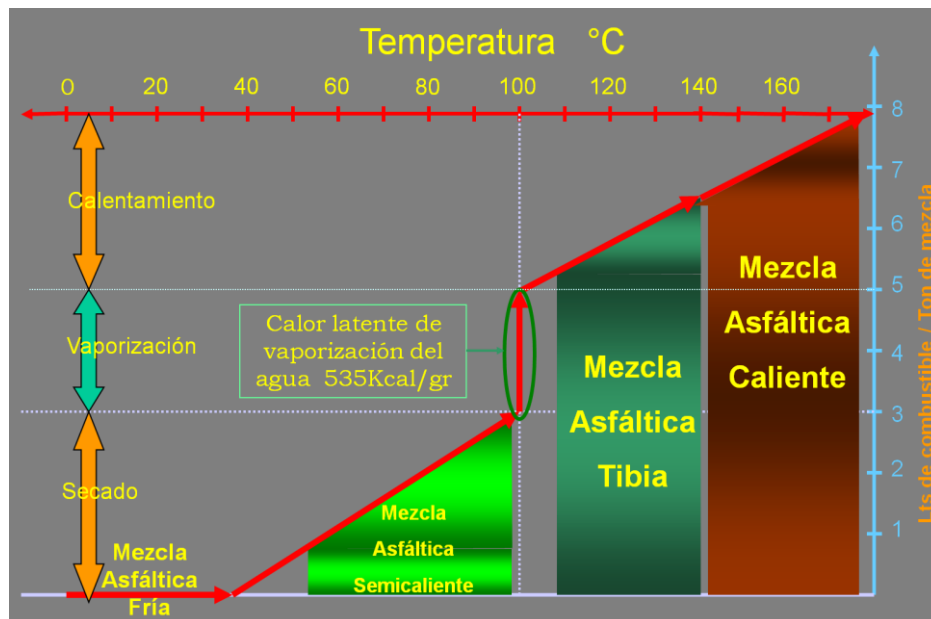
Los aerosoles orgánicos, expresados en fracción soluble en benceno, emitidos con WAM a aproximadamente 125°C están comprendidas en el rango inferior encontrado comúnmente para la extensión de mezclas en caliente cuando se utiliza una administración satisfactoria del producto (v.g. el uso de la temperatura mínima recomendada).

Los resultados obtenidos en este estudio están de acuerdo con un estudio previo de Shell Bitumen, que demuestra que en el intervalo de temperatura relevante para aplicaciones de pavimentación (aproximadamente 140 a 190°C), la tasa de emisión de humos aumenta por un factor de 2 por cada 12°C aproximadamente de aumento en la temperatura.

4.4 MÉTODOS PARA PRODUCIR MEZCLAS TIBIAS

Las tecnologías para producir mezclas asfálticas se pueden clasificar de varias maneras. En este caso nos centraremos en la producción por temperatura. La Figura 7 muestra una clasificación de producción de mezclas asfálticas por gradiente calorífico y van desde frío hasta caliente. La gama de temperaturas es amplia y van desde 0°C a 30°C es decir temperatura ambiente hasta lograr los 180°C .en producción.

Figura 7. Rangos de temperatura para producción de Mezclas asfálticas



Fuente:Comision permanente del asfalto.nov 2008

Tabla 4. Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura

Nombre de la Mezcla	Temperatura	Objetivo	Logro
Mezclas en Frío	de 25°C a 60°C	Permitir la incorporación en la mezcla de una alta proporción, de material reciclado.	Las mezclas en Frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo e incluso, capas de rodadura.
Mezclas Semitempladas	60°C a 100°C	Maximizar los ahorros energéticos y las emisiones aprovechando parte de la humedad presente en los agregados.	Se están desarrollando varios productos y procesos para producir mezclas semi-templadas, a partir de emulsiones en planta, que resulten convencionales a los procesos de mezcla en caliente. Aunque los procesos más ambiciosos de reducción de temperatura hacen uso de las propiedades de espumado del asfalto, cuando entra en contacto con el aire y la humedad bajo presión; así, a medida que se expande el volumen del asfalto, su viscosidad disminuye y

Nombre de la Mezcla	Temperatura	Objetivo	Logro
			se hace posible el revestimiento completo de los agregados. (Hassan, 2009)
Mezclas Tibias WMA	100°C a 135°	Reducir los requerimientos térmicos de las mezclas en caliente	Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere una tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y tendido, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso. (Transportation Research Board of the National Academies, 2009)
Mezclas en caliente	135°C a 180°	Producción de mezcla asfáltica convencionalmente.	Son mezclas producidas por técnicas convencionales donde la temperatura de producción es elevada. Estas mezclas son de alto desempeño.

Fuente:Comision permanente del asfalto.nov 2008

4.4.1 Sistemas mediante el uso de aditivos.

• Principio

- Adicionar al ligante un modificador de la viscosidad, frecuentemente se utilizan ceras.
- Se debe agregar en la planta de mezcla o directamente al ligante (esta es la mejor solución), debido a la homogeneidad que se requiere de mezclado entre el asfalto y el aditivo.

• Resultados

- Fácil de utilizar, no es necesario inversiones ni modificación de la planta
- Temperatura de mezcla de 130-140°C,
- Reducción de la temperatura limitada.
- Se mejora la trabajabilidad en la mezcla.

- Puede mejorar la resistencia al ahuellamiento.

- **Sistemas utilizados**

- Shell S-Grades
- Sasobit®, Licomont, Asphaltan

Figura 8. Apariencia del aditivo granulado. Sasobit



4.4.2 Sistemas a base de espuma (1/3) - Zeolita

- **Principio**

- Añadido a los agregados a 130°C,
- El agua se agrega en forma de vapor
- El betún se espuma incrementando su volumen

- **Aluminosilicatos sintéticos húmedos**

- Red de silicatos con grandes espacios vacíos
- Agua encapsulada, alrededor del 20% de agua cristalizada.

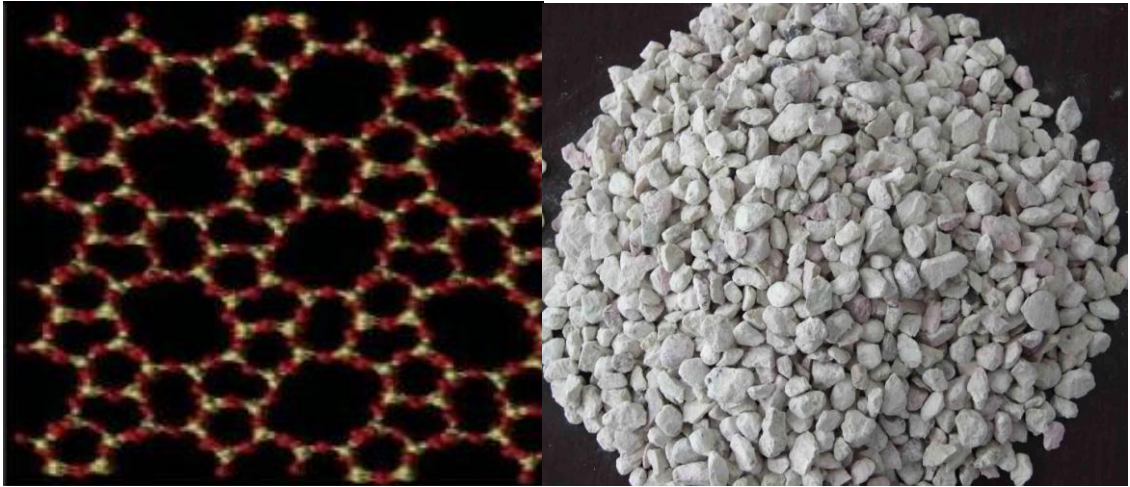
- **Resultados**

- Uso de un alimentador adicional en la planta de mezcla

– Temperatura de mezcla alrededor de 130°C

- **Sistemas.** Aspha-Min ® de Eurovia

Figura 9. Estructura de la zeolita, bajo microscopio



4.4.3 Sistemas a base de espuma (2/3) – LEA

- **Principio**

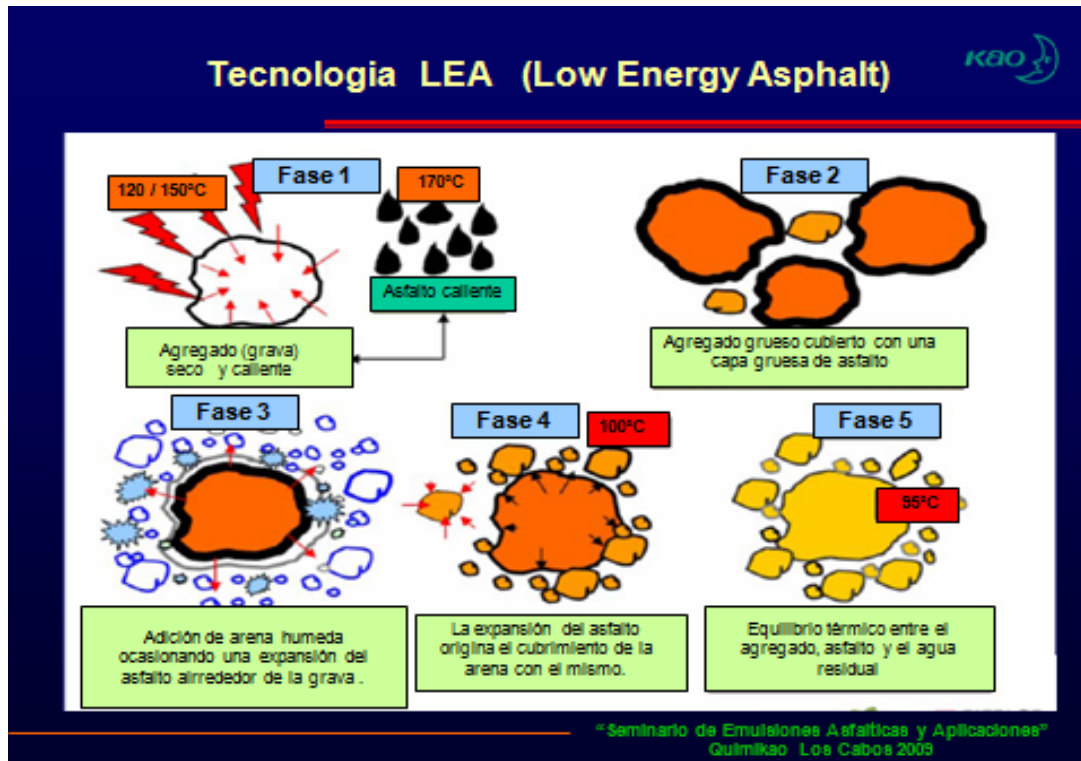
- Uso de arena húmeda a temperatura ambiente,
- Un aditivo en el ligante,
- Agua lanzada como espuma de betún

- **Resultados**

- Necesidad de un control preciso del contenido de agua
- Introducción de los agregados en 2 etapas
- Temperatura de mezcla sobre 100°C

- **Sistemas.** LEA ® de Fairco & Eiffage para “Low Energy Asphalt”

Figura 10. Fases para producir mezcla tibia tecnología LEA



4.4.4 Sistemas a base de espuma (3/3). Planta de Doble Tambor

- **Principio**

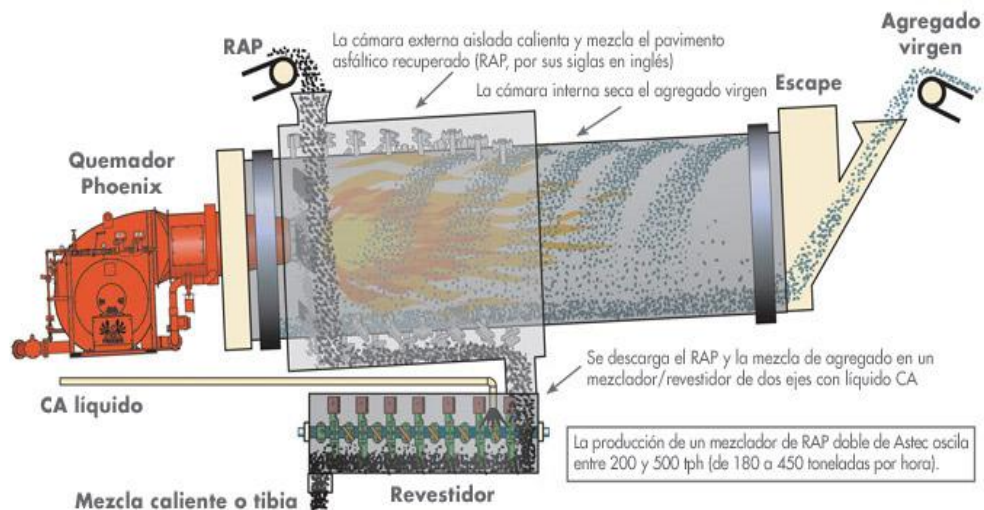
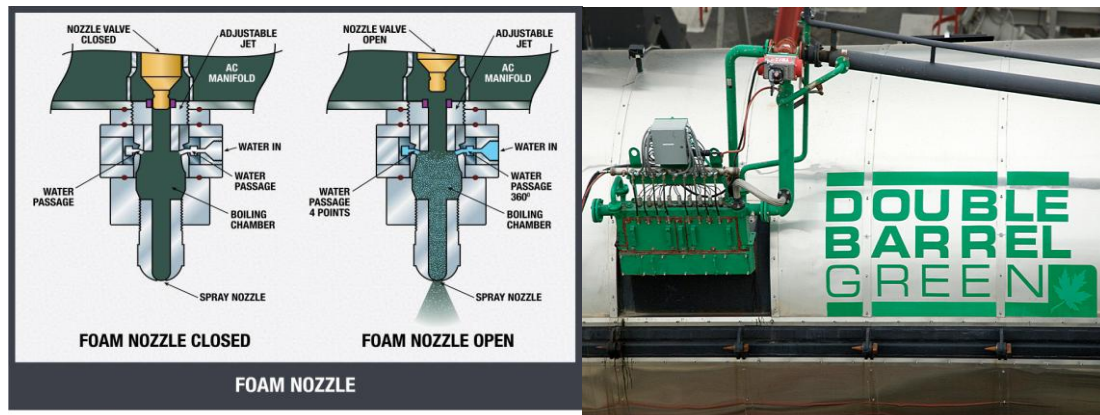
- El betún es introducido directamente como espuma en el tambor de Mezcla
- El incremento del volumen del betún asegura la envuelta de los agregados

- **Resultados**

- Planta de mezcla especial con doble barril y unidad de espuma
- Reducción de la temperatura de 10°C a 30°C.

- **Sistemas.** Double-Barrel ® green from Astec

Figura 11. Sistema de inyección del asfalto en forma de espuma



4.4.5 Sistema de doble envuelta – Shell WAM foam. Fue desarrollado en 1997

• Principio

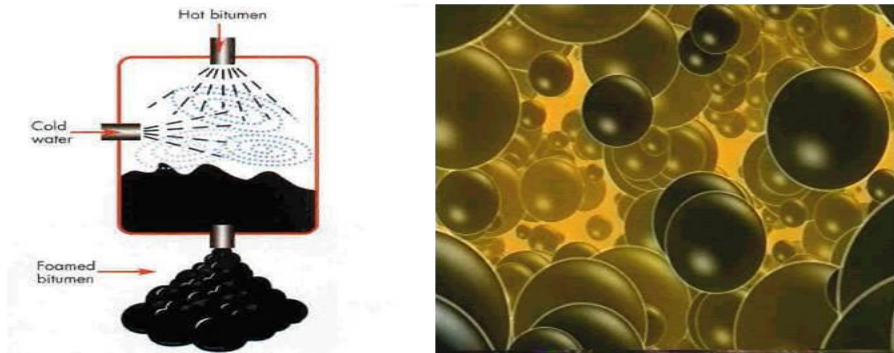
- Un betún blando con una viscosidad baja para en primer lugar, envolver los agregados,
- Y un betún duro en forma de espuma para recubrir la parte superficial

• Resultados

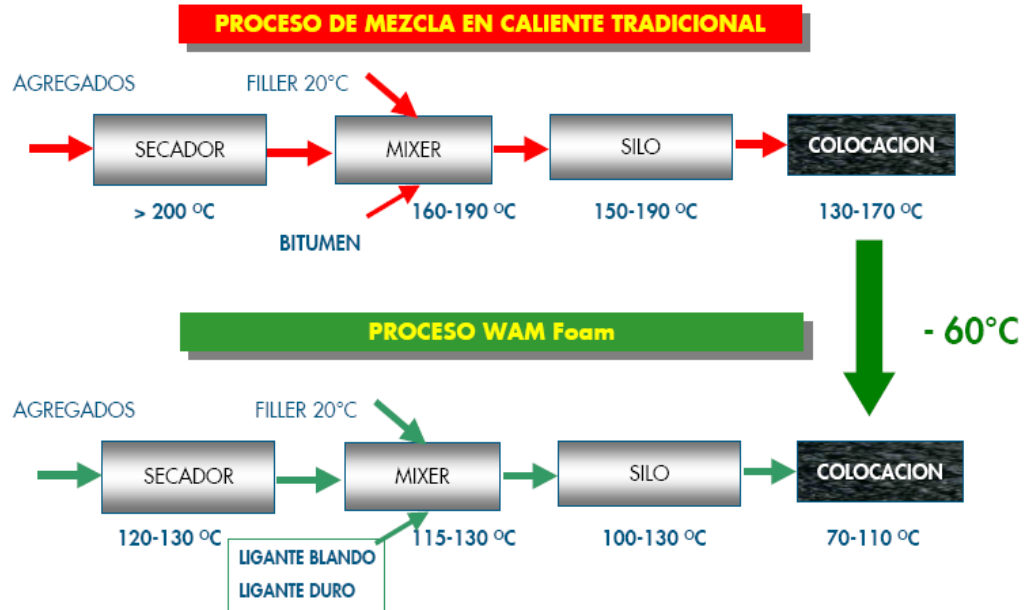
- Reducción de temperatura de hasta de 60°C

- Similar desempeño que una mezcla asfáltica en caliente.

Figura 12. Sistema de doble envuelta – Shell WAM foam



Proceso de Mezcla en caliente & Shell WAM Foam

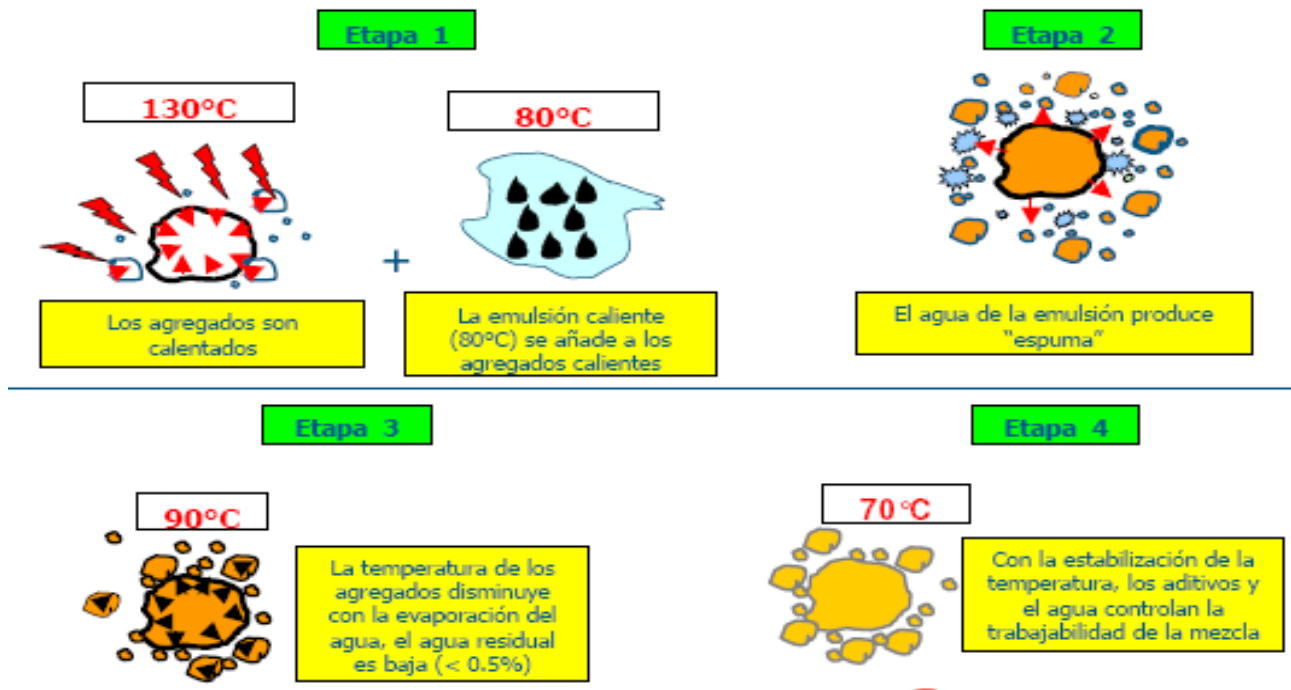


4.4.6 Sistema basado en emulsión.

- Principio.
- Emulsión con un emulsificante especial

- **Resultados**
 - Reducción de la Temperatura de 50 a 75°C
- **Sistemas.** Evotherm ® de Meadwestvaco

Figura 13. Etapas para producir mezcla tibia basada en emulsión



4.5 EL CRUDO DE PALMA

4.5.1 Historia. La palma de aceite es una planta tropical propia de climas cálidos que crece en tierras por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar. Su origen se ubica en el golfo de Guinea en el África occidental. De ahí su nombre científico, *Elaeis guineensis* Jacq. , y su denominación popular: palma africana de aceite.

Su introducción a la América tropical se atribuye a los colonizadores y comerciantes esclavos portugueses, que la usaban como parte de la dieta alimentaria de sus esclavos en el Brasil.

En 1932, Florentino Claes fue quien introdujo la palma africana de aceite en Colombia y fueron sembradas con fines ornamentales en la Estación Agrícola de Palmira (Valle del Cauca). Pero el cultivo comercial sólo comenzó en 1945 cuando la United Fruit Company estableció una plantación en la zona bananera del departamento del Magdalena.

La expansión del cultivo en Colombia ha mantenido un crecimiento sostenido. A mediados de la década de 1960 existían 18.000 hectáreas en producción y hoy existen más de 360.000 hectáreas (a 2010) en 73 municipios del país distribuidos en cuatro zonas productivas:

- Norte - Magdalena, Norte del Cesar, Atlántico, Guajira
- Central - Santander, Norte de Santander, sur del Cesar, Bolívar
- Oriental - Meta, Cundinamarca, Casanare, Caquetá
- Occidental – Nariño
- Zona Andina, Antioquia, Urabá

Los departamentos que poseen más área sembrada en palma de aceite son en su orden: Meta (1), Cesar (2), Santander (3), Magdalena (4), Nariño (5), Casanare (6), Bolívar (7), Cundinamarca (8) y Norte de Santander (9).

Colombia es el primer productor de palma de aceite en América Latina y el cuarto en el mundo. Tiene como fortaleza un gremio que cuenta con sólidas instituciones, ya que desde 1962 fue creada la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite.

Figura 14. Distribución geográfica de los principales productores de palma de aceite en Colombia



4.5.2 La planta. En una palma de aceite se mezclan flores masculinas y femeninas, de las que nacen frutos por millares, esféricos, ovoides o alargados, para conformar racimos compactos de entre 10 y 40 kilogramos de peso. Antes de adquirir el alegre y vistoso color anaranjado rojizo del sol tropical que les brinda la madurez, los frutos son de color violeta oscuro, casi negro. En su interior guardan una única semilla, la almendra o palmiste, que protegen con el cuesco, un endocarpio leñoso rodeado, a su vez, por una pulpa carnosa. Ambas, almendra y pulpa, proveen aceite con generosidad. La primera, el de palmiste, y la segunda, el de palma propiamente dicho.

El tallo o estípote de la reina de las oleaginosas es erecto y tiene la forma de un cono invertido. Antes de envejecer es áspero, por las bases peciolares que lo revisten. Pero cuando llega a la vejez, aunque liso, se muestra segmentado por las cicatrices que le imprimen sus cerca de cuarenta hojas al marchitarse y caer.

Figura 15. Plantas de palma de aceite



En su edad mediana las hojas se extienden de manera casi paralela al suelo, entre tres y siete metros. Cada una está compuesta de unos 25 o folíolos lineales, insertos a uno y otro lado del pecíolo, pero de manera irregular. La apariencia desordenada de la hoja es uno de los rasgos característicos de la especie. A partir de los veinte o veinticinco años el tallo de la palma de aceite alcanza una altura que dificulta las labores de cosecha y marca el comienzo de la renovación en las plantaciones comerciales.

4.5.3 Proceso Agroindustrial. El procesamiento de los frutos de la palma de aceite se lleva a cabo en la planta de beneficio o planta extractora. En ella se desarrolla el proceso de extracción del aceite crudo de palma y de las almendras o del palmiste.

Figura 16. Planta de beneficio de palma de aceite



Fuente Fedepalma

El proceso consiste en esterilizar los frutos, desgranarlos, macerarlos, extraer el aceite de la pulpa, clarificarlo y recuperar las almendras del bagazo resultante. De las almendras se obtienen dos productos: el aceite de palmiste y la torta de palmiste que sirve para alimento animal.

Al fraccionar el aceite de palma se obtienen también dos productos: la oleína y la estearina de palma. La primera es líquida en climas cálidos y se puede mezclar con cualquier aceite vegetal. La otra es la fracción más sólida y sirve para producir grasas, principalmente margarinas y jabones. Las propiedades de cada una de las porciones del aceite de palma explican su versatilidad, así como sus numerosas aplicaciones.

4.5.4 Usos. Por su composición física, el aceite de palma puede usarse en diversas preparaciones sin necesidad de hidrogenarse, proceso mediante el cual

se forman los trans, indeseables ácidos grasos precursores de enfermedades como la diabetes y los cardiovasculares, entre otras.

Actualmente, es el segundo aceite más consumido en el mundo y se emplea como aceite de cocina, para elaborar productos de panadería, pastelería, confitería, heladería, sopas instantáneas, salsas, diversos platos congelados y deshidratados, cremas no lácteas para mezclar con el café.

A su vez, los aceites de palma y palmiste sirven de manera especial en la fabricación de productos oleoquímicos como los ácidos grasos, ésteres grasos, alcoholes grasos, compuestos de nitrógeno graso y glicerol, elementos esenciales en la producción de jabones, detergentes, lubricantes para pintura, barnices, gomas y tinta.

En los últimos tiempos ha venido tomando fuerza su utilización como biocombustible. El biodiésel en la actualidad es una nueva alternativa para la utilización del aceite de palma como materia prima de otros productos.

Figura 17. Algunos de los usos de la palma de aceite



4.5.5 La palma de aceite como cultivo ecológico. Las palmas de aceite adultas conforman verdaderos paisajes forestales donde cohabitan numerosas especies

de flora y fauna. Crean microclimas y ambientes favorables para la sostenibilidad de los cultivos y el bienestar de las poblaciones que habitan alrededor de ellas.

Por fijar cantidades considerables de gas carbónico mediante la fotosíntesis, esta planta contribuye a mitigar el calentamiento global. Todas las partes de la palma se utilizan, por lo tanto no hay desperdicios que contaminen.

Dentro de los cultivos de semillas oleaginosas, la palma de aceite es la más eficiente en la conversión de energía y su siembra previene la erosión.

5. METODOLOGÍA

5.1 TIPO DE ESTUDIO

El estudio que se realiza es de tipo experimental, y durante la investigación el bioasfalto es evaluado en su desempeño utilizando como técnica los ensayos de laboratorio. Durante los ensayos se controla de forma deliberada su composición para los fines de la investigación y según un plan preestablecido.

5.2 ORGANIZACIÓN, SISTEMATIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Para alcanzar cada uno de los objetivos específicos y, resolver y dar cumplimiento al objetivo general es necesario realizar una búsqueda bibliográfica de forma constante, de recursos relacionados con el tema de las mezclas tibias y los métodos de producción, de igual manera, resulta de la mayor importancia llevar a cabo ensayos en laboratorio para saber cuál es el potencial del bioasfalto. Las actividades orientadas a lograr cada uno de los objetivos de la investigación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5. Objetivos y actividades de la investigación

OBJETIVO	ACTIVIDADES
Producir bioasfalto a partir de la mezcla de aceite crudo de Palma y asfalto base, definiendo las proporciones que satisfagan las normas estipuladas por INVIAS en 2007, para la producción de mezcla asfáltica.	<ul style="list-style-type: none">• Ubicación y selección de las fuentes de producción de aceite crudo de palma, para caracterizar dicho crudo, identificar sus componentes y definir con base en los resultados; el material vegetal que resulta más apropiado para utilizarlo como modificador de la viscosidad del asfalto.• Caracterización del asfalto base que se desea modificar, para definir sus propiedades.• Dosificación y mezcla en laboratorio, de las proporciones crudo de palma y asfalto base.• Realización de ensayos de viscosidad Brookfield, para cada porcentaje de adición de crudo de palma.

OBJETIVO	ACTIVIDADES
<p>Elaborar el diseño procedimental para la producción de la mezcla asfáltica, de acuerdo al Método Marshall, y a la caracterización precisa de materiales asfálticos y pétreos, aplicados a una mezcla asfáltica tipo semidensa 2 (MSC-2).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de curvas de viscosidad vs temperatura, ensayos de penetración, punto de ablandamiento e índice de penetración del bioasfalto producido. • Escogencia del porcentaje óptimo de crudo de palma, que le proporcione al asfalto base la mayor disminución de la viscosidad a la misma temperatura, y cumpla la norma INVIAS. • Elaboración de la curva reológica del asfalto modificado (bioasfalto), con el fin de determinar las temperaturas mezclado y compactación de las mezcla. • Definición de la fuente de los materiales pétreos, para elaborar la mezcla asfáltica. • Caracterización por medio de ensayos de laboratorio, de los materiales a utilizar de acuerdo a la norma INVIAS 2007. • Calcular la curva granulométrica para una mezcla asfáltica semidensa MSC-2, y definirla como curva para la fórmula de trabajo. • Fabricación de las probetas a utilizar, para cada porcentaje de asfalto definido. • Elaboración del diseño de la mezcla asfáltica de acuerdo al método Marshall, dibujar las curvas y definir la formula de trabajo. • Elaboración de las probetas usadas en laboratorio, con la fórmula de trabajo obtenida para ejecutar las pruebas de desempeño dinámico de las mezclas.
<p>Establecer una comparación que permita la evaluación de desempeño en el laboratorio, entre las mezclas asfálticas tibias con bioasfaltos a partir de aceite crudo de Palma), y las mezclas asfálticas producidas en caliente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación de los resultados de desempeño de la mezcla tibia con resultados de las mezclas en caliente.

La estrategia de investigación para la sistematización de los datos obtenidos, es la de recopilación de la información en reportes de campo, informes, y tablas

5.3 ALCANCE DEL TRABAJO

5.3.1 Resultado 1. Producción en el laboratorio de mezcla asfáltica de tipo semidensa 2 (MSC-2), con asfalto modificado, a partir de Aceite Crudo de Palma.

- **Característica.** Mezclas de tipo semidensas 2 (MSC-2), con asfalto modificado, a partir de aceite de crudo de palma
- **Evidencia.** Asfalto modificado con Aceite Crudo de Palma producido.

5.3.2 Resultado 2. Diseño procedimental, para la evaluación en el laboratorio de mezclas de tipo semidensa 2 (MSC-2), con asfalto modificado, a partir de Aceite Crudo de Palma. Evaluación del potencial reductor de viscosidad del crudo de palma, a diferentes porcentajes de adición, en el asfalto convencional de penetración 60—70

- **Características.** Curvas de viscosidad vs temperatura, porcentaje óptimo de Aceite Crudo de Palma para el cumplimiento de la norma INVIAS 2007, Curva Reológica, Fuentes de materiales pétreos, curvas granulométrica, probetas para cada porcentaje de asfalto definido, diseño de la mezcla asfáltica de acuerdo al método Marshall (con gráfico de curvas y fórmula de trabajo), y probetas para las pruebas de desempeño dinámico de las mezclas.
- **Evidencia.** Diseño procedimental para la producción de asfalto modificado con Aceite Crudo de Palma

5.3.3 Resultado 3. Comparación en el laboratorio, del desempeño mecánico del asfalto modificado, contra el desempeño mecánico de las mezclas convencionales en caliente, a partir de las curvas de medición, obtenidas en la etapa inmediatamente anterior.

- **Característica.** Datos que permiten decidir sobre la conveniencia de usar asfalto modificado con aceite de crudo de palma
- **Evidencia.** Comparación escrita de desempeño de los dos tipos de mezclas asfálticas.

6. RESULTADOS DEL ESTUDIO

6.1 DESARROLLO DEL PROCESO

6.1.1 Objetivo Uno. Adquisición del crudo de palma procedente de las siguientes partes del país:

6.1.1.1 Muestra 1. Esta muestra fue suministrada por dismaprim, esta plantación está ubicada en el departamento de Cundinamarca y cuenta con las siguientes características químicas.

- **Descripción del producto:** Crudo de Palma 100% vegetal; **Usos:** Es usado en la industria para fabricar jabones, comida de animales, materia prima para comida industrial, biocombustibles, plastificantes entre otros.
- **Características:** Apariencia semi-sólida, de color naranja o rojizo. Dependiendo del tiempo de almacenamiento puede cambiar la acidez y puede ser de olor rancio.

Tabla 6. Características técnicas generales del Crudo de Palma

ESPECIFICACION	VALORES	UNIDADES	METODO AOCS
Acidez	5.0 Max	%Palmítico	Ca5a-40
Color	15R-20R;30A	Celda ½"	Cc13b-45
Humedad y material. volátil	0.15 Max	%	Ca2c-25
Impurezas	0.1 Máx	%	Ca3-46
Índice de peróxido	4.0 Máx	Meq/kg	Cd8-53
Índice de lodo	53-55	Wijs	Cd1-25
Punto de fusión Mettler	39.0-40.	°C	Cc18-80
Hierro	1.0 Máx	Ppm	Ca 15-75

ESPECIFICACION	VALORES	UNIDADES	METODO AOCS
Cobre	Negativo	Ppm	Ca 15-75

Tabla 7. Características del crudo de palma de Dismaprim

ESPECIFICACION	VALORES	UNIDADES	METODO AOCS
Acidez	4.0 Max	%Palmítico	Ca5a-40
Color	15R	Celda ½"	Cc13b-45
Humedad y material. volátil	0.11	%	Ca2c-25
Impurezas	0.1	%	Ca3-46
Índice de peróxido	3.0 Máx	Meq/kg	Cd8-53
Índice de lodo	50	Wijs	Cd1-25
Punto de fusión Mettler	40	°C	Cc18-80
Hierro	0.0	Ppm	Ca 15-75
Cobre	Negativo	Ppm	Ca 15-75

Fuente: Dismaprim

- **Almacenamiento:** Para incrementar la vida útil del producto se recomienda almacenarlo en tanques con filtros húmedos y previstos de calor.

La vida útil del producto depende de las condiciones de almacenamiento. El valor del ácido graso libre aumenta con el tiempo de almacenamiento y su utilidad depende de de su aplicación específica.

6.1.1.2 Muestra 2. Esta muestra fue suministrada por Palmagro, ubicada en becerril Cesar. Las características técnicas del producto son las siguientes.

Tabla 8. Características del crudo de palma de Palmagro

ESPECIFICACION	VALORES	UNIDADES	METODO AOCS
Acidez	5.0	%Palmítico	Ca5a-40
Color	15R	Celda ½"	Cc13b-45
Humedad y material. volátil	0.09	%	Ca2c-25
Impurezas	0.1	%	Ca3-46
Índice de peróxido	3.0	Meq/kg	Cd8-53
Índice de lodo	50	Wijs	Cd1-25
Punto de fusión Mettler	39	°C	Cc18-80
Fierro	0.0	Ppm	Ca 15-75
Cobre	Negativo	Ppm	Ca 15-75

Fuente Palmagro

6.1.1.3 Muestra 3.

Tabla 9. Características del crudo de palma de Santa Marta

ESPECIFICACION	VALORES	UNIDADES	METODO AOCS
Acidez	9.0	%Palmítico	Ca5a-40
Color	15R	Celda ½"	Cc13b-45
Humedad y material. volátil	0.20	%	Ca2c-25
Impurezas	0.9	%	Ca3-46
Índice de peróxido	5.0	Meq/kg	Cd8-53
Índice de lodo	61	Wijs	Cd1-25
Punto de fusión Mettler	39	°C	Cc18-80
Fierro	1,3	Ppm	Ca 15-75
Cobre	Negativo	Ppm	Ca 15-75

Fuente crudo Santa marta.

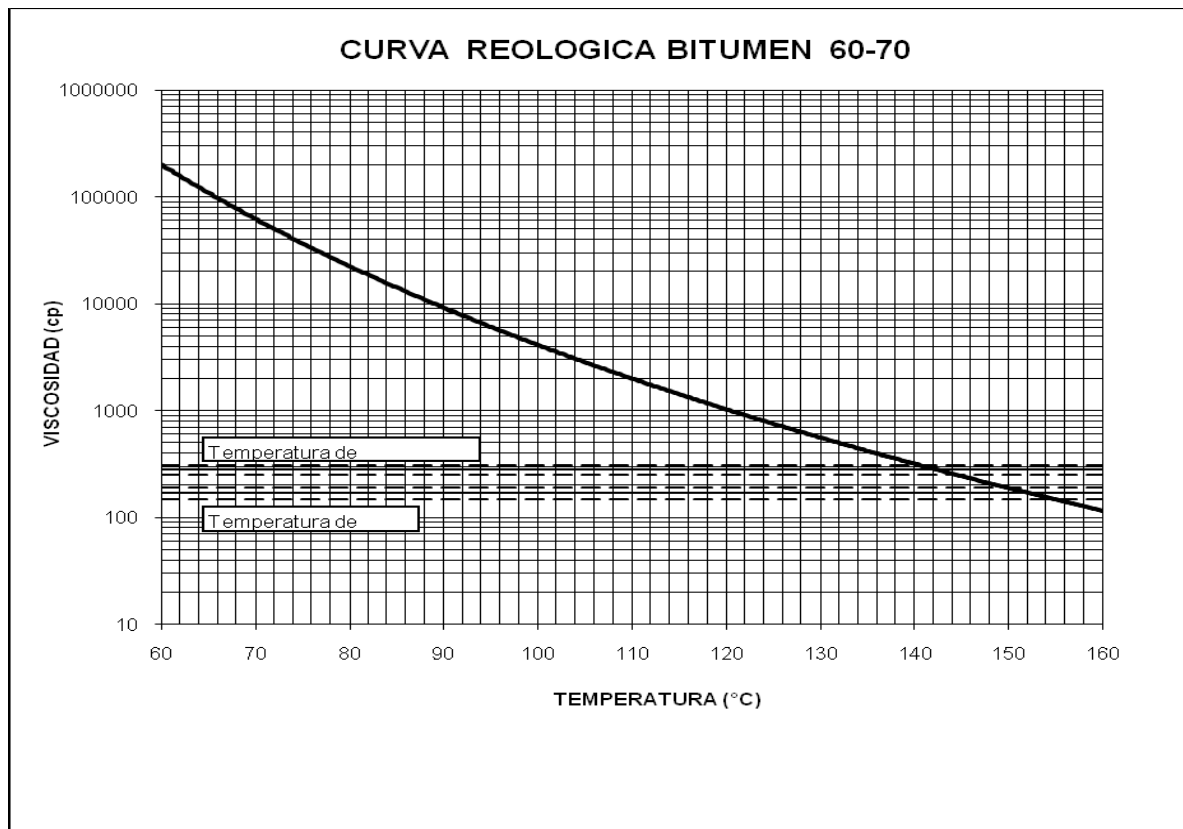
Este crudo de palma no se utiliza para los ensayos debido a que no cumple con las especificaciones de control de calidad.

6.1.2 Caracterización del asfalto Base. Se realizan los ensayos de laboratorio con el fin de identificar las características del asfalto base a utilizar

Tabla 10. Ensayo de viscosidad asfalto base

ENSAYO DE VISCOSIDAD BROOKFIELD PROCEDENCIA: ECOPETROL ASFALTO 60 - 70 - ASFALTO BASE					
Obra:	PLANTA				
FECHA DEL ENSAYO:	MARZO 03/2011				
Temperatura de Ensayo	60°	80°	100°	135°	150°
VELOCIDAD DE GIRO EN rpm	1.2	12	70	120	200
REFERENCIA O Número y Tamaño del vastago utilizado	27	27	27	21	21
Torque 1 medido Expresado en %	95.4	90	90.2	89.1	74.3
Torque 2 medido Expresado en %	95.3	90.1	90.2	89	74.2
Torque 3 medido Expresado en %	95.3	90	90.1	89	74.1
Viscosidad 1 (Cp)	199000	18563	3221	370.8	185.8
Viscosidad 2 (Cp)	199000	18563	3221	370.8	185.5
Viscosidad 3 (Cp)	199000	18563	3218	370.8	185.2
Promedio Viscosidad (Cp)	199000	18563	3220	371	186
Promedio Viscosidad Brookfield Pa *s.					
ESPECIFICACION VISCOSIDAD I.N.V.					
EQUIPO UTILIZADO	MARCA Y REFERENCIA				
Viscosímetro	BROOKFIELD DV - II + Pro				
Observación <u>L a muestra se tomo del tanque de almacenamiento</u>					

Figura 18. Curva reologica asfalto base



6.1.3 Dosificación en laboratorio Crudo de palma Asfalto. Como ya se anotó, en las pruebas elaboradas para el crudo de palma, solo cumple especificaciones los crudos de Becerril y Cundinamarca, se descarta el de Santa Marta por obvias razones.

Dado que el crudo de Palma lo consideramos como un aditivo modificador de la viscosidad del asfalto base, su utilización y dosificación obedeció a los parámetros que se usan para dichos objetivos, es decir, se establece una cantidad que sea menor a 1%, controlando los resultados obtenidos con cada porcentaje. Para tal efecto se consideraron cantidades de 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1.0% generando con estos valores una regresión logarítmica en el plano viscosidad vs temperatura.

Con el fin de determinar el potencial reductor de viscosidad de crudo de palma en el cemento asfáltico, se procedió a elaborar las pruebas y ensayos de viscosidad frente al asfalto base utilizado (ver tabla 10) que fue el mismo en ambas pruebas, la dosificación utilizada en ambos ensayos se realizó de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 11. Dosificación del crudo de palma versus Cemento asfáltico Base 60-70

Crudo de Palma	Dosificaciones			
Dismaprim	0.3%	0.5%	0.7%	1.0%
Palmagro	0.3%	0.5%	0.7%	1.0%

6.1.3.1 Resultados dosificación crudo de palma Dismaprim. Los resultados de la dosificación para el crudo de palma Dismaprim en los porcentajes indicados (tabla 11) y utilizando como asfalto base el 60-70 se presentan a continuación.

Tabla 12. Viscosidades a diferentes temperaturas para concentraciones de Aceite de Palma Dismaprin

Dosificación	Temperaturas				
Dismaprin al 0,3%	60	80	100	135	150
	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP
	186000	17625	3100	357,1	188,3
	185900	17646	3150	358,2	185,2
	186100	17583	3200	358,2	184,2
	186000	17618	3150	358	186
Dosificación	Temperaturas				
Dismaprin al 0,5%	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP
	174000	16800	3150	351	183
	175000	17125	3100	353	185
	174000	17042	3009	353	182
	174333	16989	3086	352	183

Dismaprin al 0,7%	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP
	138000	14300	2200	300	150
	135000	14100	2500	295	160
	136000	14000	2450	310	157
	136333	14133	2383	302	156
Dismaprin al 1%	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP
	122000	10005	1650	180	100
	124000	10000	1655	175	102
	121800	9900	1657	175,9	100
	122600	9968	1654	178	101

Figura 19. Curvas de viscosidad de asfalto con adición de aceite Dismaprim

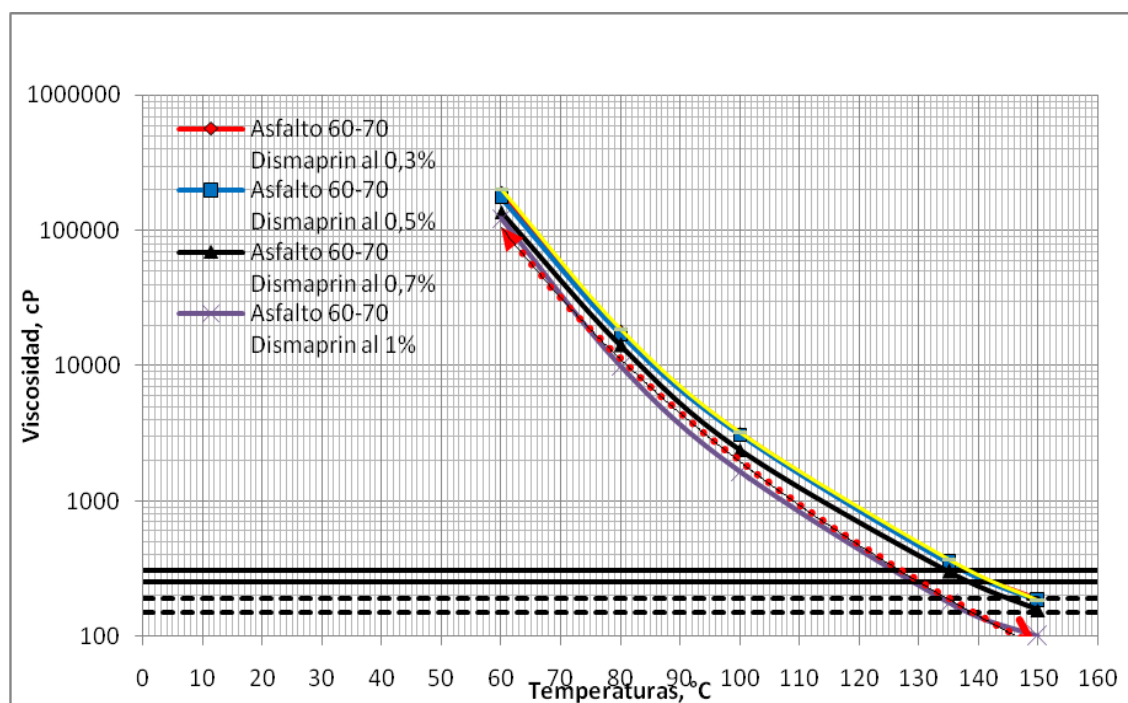


Tabla 13. Variaciones con adiciones de aceite Dismaprim

Variación de la Viscosidades en cP vs concentraciones de Dismaprim						
<i>Dismaprim, %</i>	<i>Viscosidad a 60° C</i>	<i>Viscosidad a 80° C</i>	<i>Viscosidad a 100° C</i>	<i>Viscosidad a 135° C</i>	<i>Viscosidad a 150° C</i>	
0,3	186000	17618	3150	358	186	
0,5	174333	16989	3086	352	183	
0,7	136333	14133	2383	302	156	
1,0	122600	9968	1654	178	101	

Variación en las Temperaturas de Trabajo						
<i>Dismaprim, %</i>	<i>Temp. Mezcla, °C</i>		<i>Promedio Mezcla</i>	<i>Temp. Compac, °C</i>		<i>Promedio Compac</i>
0,3	151	156	153,5	144	146	145,0
0,5	149	155	152,0	142	146	144,0
0,7	145	151	148,0	134	148	141,0
1,0	132	138	135,0	126	129	127,5

Rango Viscosidad	150	190	250	310	CSt o mm ² /s
------------------	-----	-----	-----	-----	--------------------------

Rangos de temperatura de trabajo				
0	150	190	250	310
160	150	190	250	310

Figura 20. Variación de la viscosidad con adiciones de aceite Dismaprim

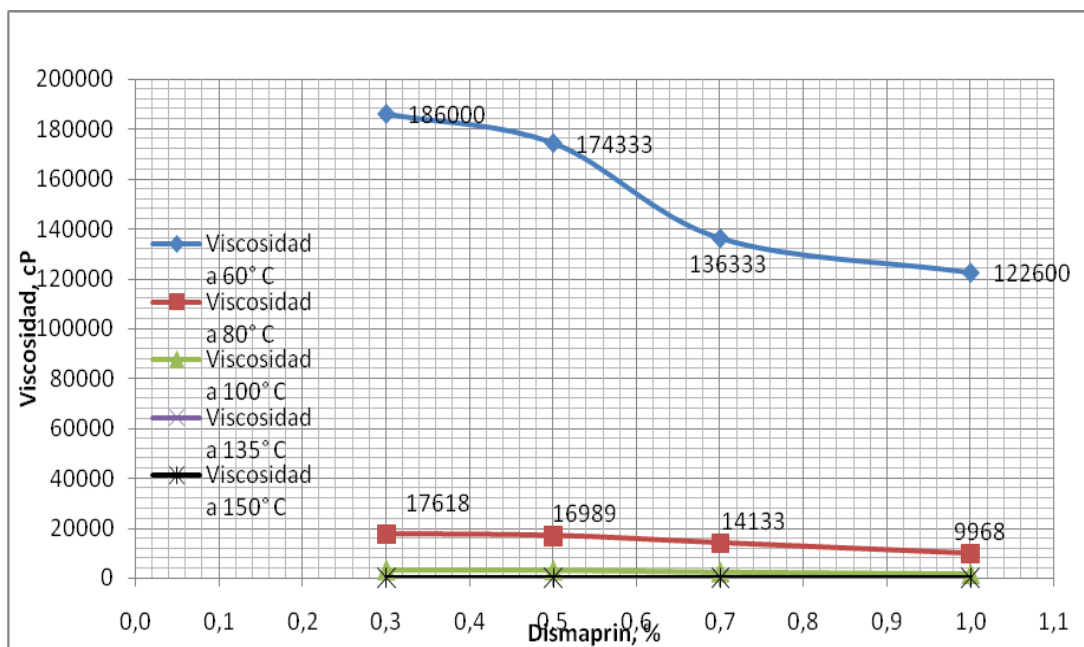
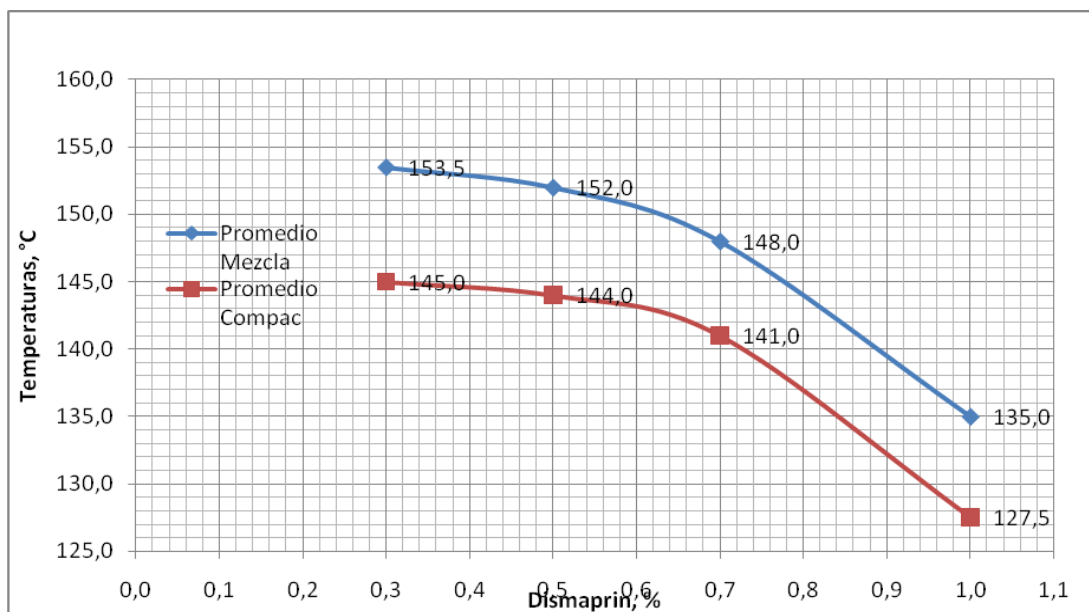


Figura 21. Variación de las temperaturas de trabajo con adiciones de Dismaprim



6.1.3.2 Resultados dosificación crudo de palma Palmagro. Los resultados de la dosificación para el crudo de palma Palmagro en los porcentajes indicados (ver tabla 11) y utilizando como asfalto base el 60-70 se presentan a continuación.

Tabla 14. Viscosidades a Diferentes Temperaturas para concentraciones de Aceite de Palma Palmagro

Dosificación	<i>Temperaturas</i>				
	<i>60</i>	<i>80</i>	<i>100</i>	<i>135</i>	<i>150</i>
	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP
Palmagro al 0,3%	186000	17625	3047	357,1	188,3
	185900	17646	3037	358,2	185,2
	186100	17583	3031	358,2	184,2
	186000	17618	3038	358	186
Palmagro al 0,5%	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP
	160000	17542	3081	348,43	180,5
	160342	17271	3047	350,36	180,25
	160454	17110	3022	350,71	180,75
	160265	17308	3050	350	181

Palmagro al 0,7%	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP
	140333	14800	2400	290	155
	141234	14500	2390	291	156
	142222	14200	2405	285	156
	141263	14500	2398	289	156
Palmagro al 1%	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP	Visco, cP
	132456	12344	1999	270,4	140,0
	131765	12328	2005	269,8	143,2
	131800	12300	2000	270	142,1
	132007	12324	2001	270	142

Figura 22. Curvas de viscosidad de asfalto con adición de aceite Palmagro

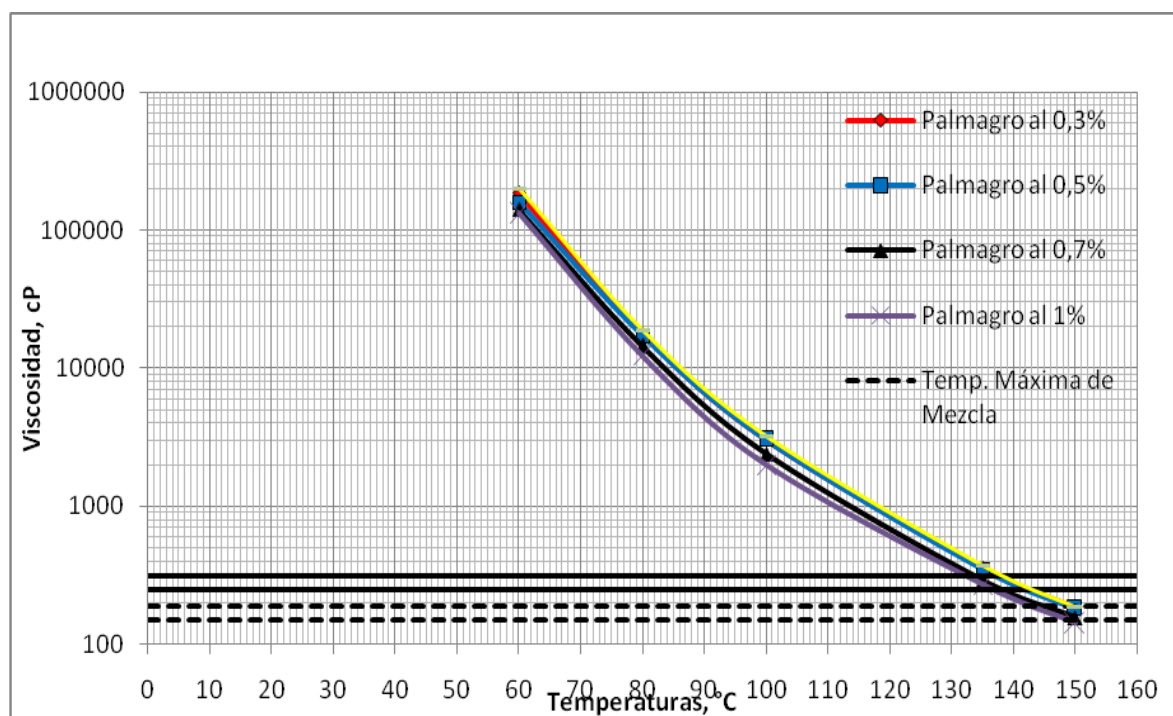


Tabla 15. Variaciones con adiciones de aceite Palmagro

Viscosidades en cP vs concentraciones de Palmagro					
Palmagro, %	Viscosidad a 60° C	Viscosidad a 80° C	Viscosidad a 100° C	Viscosidad a 135° C	Viscosidad a 150° C
0,3	186000	17618	3038	358	186
0,5	160265	17308	3050	350	181
0,7	141263	14500	2398	289	156
1,0	132007	12324	2001	270	142

Variación en las Temperaturas de Trabajo						
Palmagro, %	Temp. Mezcla, °C		Promedio Mezcla	Temp. Compac, °C		Promedio Compac
0,3	150	155	152,5	139	143	141,0
0,5	149	154	151,5	138	143	140,5
0,7	144	150	147,0	133	138	135,5
1,0	142	148	145,0	132	135	133,5

Rango Viscosidad 150 190 CSt o mm²/s 250 310 CSt o mm²/s

Rangos de temperaturas de trabajo				
0	150	190	250	310
160	150	190	250	310

Figura 23. Variación de la viscosidad con adiciones de aceite Palmagro

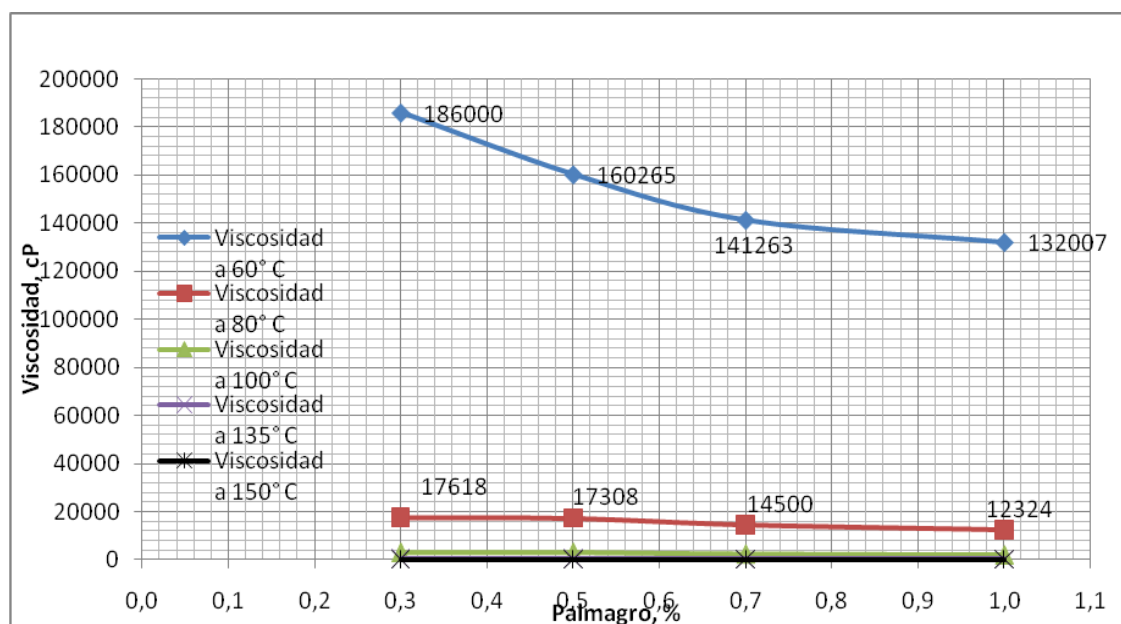
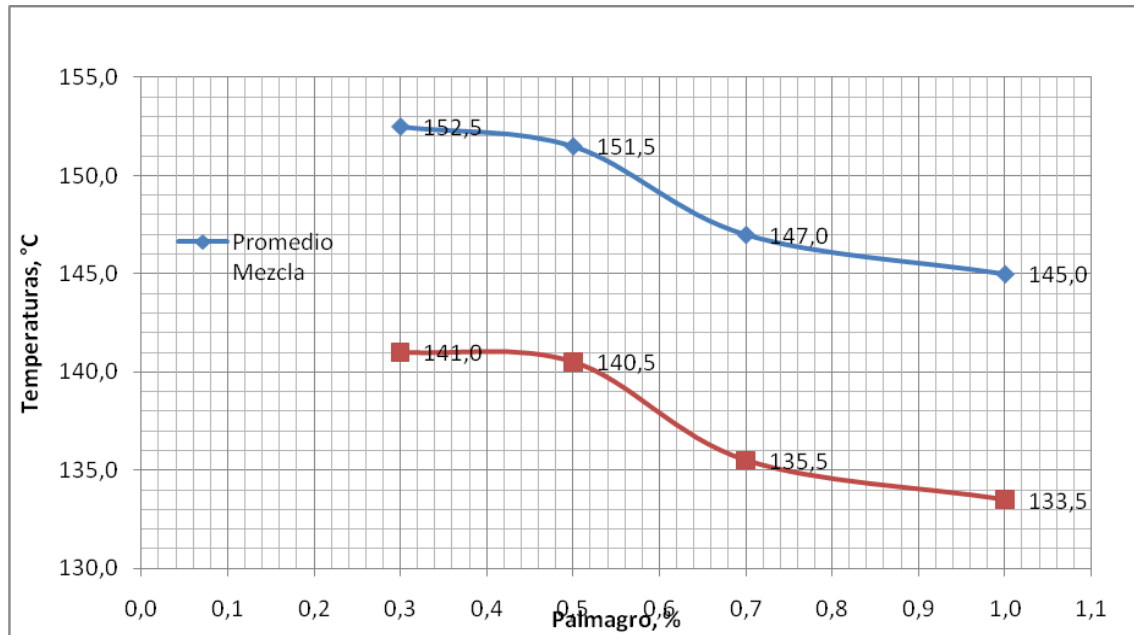


Figura 24. Variación de las temperaturas de trabajo con adiciones de Palmagro



De los resultados obtenidos y extractados de las curvas reologicas, se escoge el crudo de palma procedente de Dismaprim, y con el 1% de adición con relación al peso del asfalto. Dado que posee el mayor potencial reductor de la viscosidad.

6.1.4 Caracterización de Materiales. Los materiales pétreos se obtienen de una planta para el procesamiento de agregados en el Valle de Aburrá y de la cual se obtiene la caracterización de acuerdo a ensayos realizados a las muestras suministradas por el proveedor.

La caracterización de los materiales se hace teniendo en cuenta los ensayos realizados por ConsulCivil S.A.S. para determinar entre otros: resistencia a la abrasión, equivalente de arena, peso específico, solidez, concentración, etc. que tienen dichos materiales.

Tabla 16. Caracterización de materiales

ABRASIÓN DE AGREGADOS		
NORMA UTILIZADA	INV E-218-219	
ENSAYO	RESULTADO	
GRADACIÓN USADA	B	
Nº DE ESFERAS	11	
Nº DE REVOLUCIONES	500	
PESO MUESTRA SECA ANTES DEL ENSAYO(g)=Pa	5000,0	
PESO MUESTRA SECA DESPUÉS DEL ENSAYO(g)=Pb	3813,0	
PÉRDIDA (g) = Pa - Pb	1187,0	
% DE DESGASTE	23,7	
EQUIVALENTE DE ARENA		
NORMA UTILIZADA	INV E-133	
ENSAYO	1	2
PROBETA Nº	1	1
LECTURA DE LA ARENA (mm)	95	95
LECTURA DE LA ARCILLA (mm)	160	155
ENSAYO	1	2
EQUIVALENTE DE ARENA (%)	59	61
PROMEDIO (%)	60	
PESO ESPECÍFICO DEL LLENANTE		
NORMA UTILIZADA	INV E-128	
DETERMINACIÓN Nº	1	
TX	32	
Wa	659,0	
Wb	736,2	
(Wa - Wb)	-77,2	
Wo	120,6	
Wo + (Wa - Wb)	43,4	
GS = Wo / (Wo+(Wa - Wb))	2,777	
K	0,9968	
GS = GS*K	2,768 (promedio)	
PICNÓMETRO O Nº DE FRASCO	1	

TX =TEMPERATURA (°C)
Wa = PESO DEL PICNÓMETRO LLENO CON AGUA (g)
Wb = PESO DEL PICNÓMETRO CON AGUA Y MUESTRA (g)
Wo = PESO SECO DE LA MUESTRA (g)
GS = GRAVEDAD ESPECÍFICA
K = FACTOR DE CORRECCIÓN

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE FINOS			
NORMA UTILIZADA	INV E-222		
DETERMINACIÓN N°	1	2	PROMEDIO
A	495,4	495,3	
V	500,0	500,0	
W	320,8	321,0	
V-W	179,2	179,0	
500-A	4,6	4,7	
(V - W) - (500 - A)	174,6	174,3	
PESO ESPECÍFICO APARENTE = $A/(V - W)$	2,765	2,767	2,766
PESO ESPECÍFICO APARENTE SSS = $500/(V - W)$	2,790	2,793	2,792
PESO ESPECÍFICO NOMINAL = $A/((V - W) - (500 - A))$	2,837	2,842	2,839
ABSORCIÓN (%) = $(500-A) / A*100$	0,93	0,95	0,94

A = PESO DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO DESPUÉS DEL ENSAYO (g)
V = VOLUMEN DEL PICNÓMETRO (cm3)
W = PESO (g) O VOLUMEN (cm3) DEL AGUA AGREGADA AL PICNÓMETRO
500 = PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (g)

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE GRUESOS			
NORMA UTILIZADA	INV E-223		
DETERMINACIÓN N°	1	2	PROMEDIO
A	918,2	1030,5	
B	927,8	1042,1	
C	606,5	682,3	
B - C	321,3	359,8	
A - C	311,7	348,2	
B - A	9,6	11,6	
PESO ESPECÍFICO APARENTE = $A/(B - C)$	2,858	2,864	2,861
PESO ESPECÍFICO APARENTE SSS = $B/(B - C)$	2,888	2,896	2,892
PESO ESPECÍFICO NOMINAL = $A/(A - C)$	2,946	2,960	2,953
ABSORCIÓN (%) = $(B - A)/A*100$	1,05	1,13	1,09

A = PESO DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO DESPUÉS DEL ENSAYO (g)

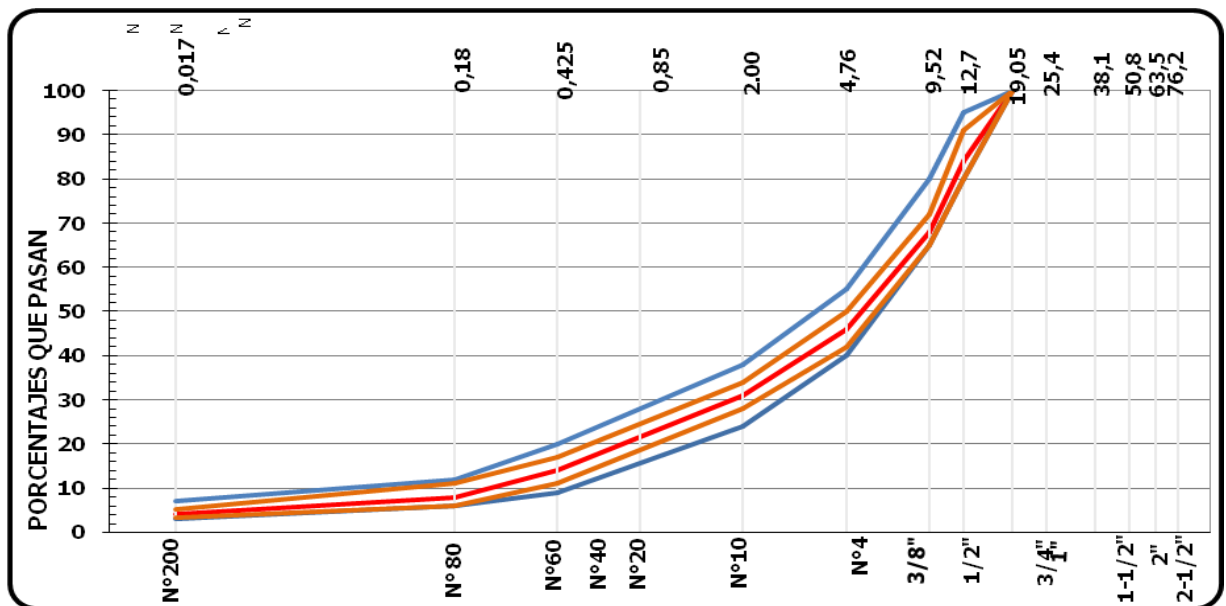
B = PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (g)						
C = PESO EN EL AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (g)						
SOLIDEZ						
NORMA UTILIZADA					INV E-220	
TIPO DE SOLUCIÓN					SULFATO DE SODIO	
FRACCIÓN GRUESA						
TAMAÑO TAMICES (% PESO)		GRADACIÓN MUESTRA ORIGINAL (%)	PESO DE LA FRACCIÓN ANTES DEL ENSAYO (g)	PESO DE LA FRACCIÓN DESPUÉS DEL ENSAYO (g)	PÉRDIDA (%)	PÉRDIDA CORREGIDA (%)
PASA	RETIENE					
3/4"	1/2"	16,1	1273,5	1261,4	1,0	0,15
1/2"	3/8"	16,3	960,0	948,8	1,2	0,19
3/8"	No. 4	21,7	423,0	417,1	1,4	0,30
PÉRDIDA = 0,6						
FRACCIÓN FINA						
TAMAÑO TAMICES (% PESO)		GRADACIÓN MUESTRA ORIGINAL (%)	PESO DE LA FRACCIÓN ANTES DEL ENSAYO (g)	PESO DE LA FRACCIÓN DESPUÉS DEL ENSAYO (g)	PÉRDIDA (%)	PÉRDIDA CORREGIDA (%)
PASA	RETIENE					
No. 4	No. 8	11,0	100,0	96,2	3,8	0,42
TAMAÑO TAMICES (% PESO)		GRADACIÓN MUESTRA ORIGINAL (%)	PESO DE LA FRACCIÓN ANTES DEL ENSAYO (g)	PESO DE LA FRACCIÓN DESPUÉS DEL ENSAYO (g)	PÉRDIDA (%)	PÉRDIDA CORREGIDA (%)
PASA	RETIENE					
No. 8	No. 16	8,0	100,0	97,0	3,0	0,24
No. 16	No. 30	9,0	100,0	97,5	2,5	0,23
No. 30	No. 50	7,0	100,0	97,5	2,5	0,18
PÉRDIDA = 1,06						
TOTAL PÉRDIDA = 1,70						
LIMPIEZA SUPERFICIAL DEL AGREGADO GRUESO						
NORMA UTILIZADA					INV E-237	
PRUEBA					RESULTADO	
PESO DE LA MUESTRA PARA PROPORCIÓN MASA SECA (M1h), (g)					4107,0	
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA (Mh), (g)					3977,5	
PESO DE LA MUESTRA SECA EN HORNO (M1s), (g)					4100,0	
ÍNDICE DE SEQUEDAD (Is=M1s/M1h)					0,998	

MASA SECA RETENIDA (m), (g)					3951,5
CANTIDAD DE MASA SECA CORRESPONDIENTE A LA MUESTRA ENSAYADA (Ms=Mh*Is), (g)					3969,5
IMPUREZAS (Ms-m), (g)					18,0
COEFICIENTE DE LIMPIEZA SUPERFICIAL (Ms-m)/Ms*100), (%)					0,45
PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO DE MEZCLAS					
NORMA UTILIZADA					INV E-735
% DE ASFALTO	PESO DE LA MUESTRA SECA EN EL AIRE (g) A	PESO DEL RECIPIENTE LLENO CON AGUA (g) D	PESO DEL RECIPIENTE LLENO CON AGUA Y MUESTRA (g) E	TEMPERATUR A DEL AGUA (°C)	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO
3,5	1995,5	11748,0	12999,0	24	2,680
4,0	1994,5	11751,0	12995,0	25	2,658
4,5	2001,1	11748,0	12990,0	25	2,636
5,0	2004,7	11748,0	12986,0	23	2,615
5,5	2005,8	11748,0	12980,0	26	2,592
6,0	2007,5	11748,0	12974,0	25	2,569
PESO UNITARIO APARENTE DEL LLENANTE EN TOLUENO					
NORMA UTILIZADA				INV E-225	
DESCRIPCIÓN				LLENANTE + 5% DE CAL	
PRUEBA				1	2
PESO DE LA MUESTRA DE LLENANTE, (g)				10,0	10,0
VOLUMEN APARENTE DEL LLENANTE (cm³)				12,0	12,5
PESO UNITARIO APARENTE DEL LLENANTE EN TOLUENO (g/cm³)				0,83	0,80
PROMEDIO (%)				0,8	
CONCENTRACIÓN CRÍTICA DEL LLENANTE					
NORMA UTILIZADA				INV E-745	
DETERMINACIÓN Nº				1	2
PESO DE LA MUESTRA DE LLENANTE, (g)				10	10
VOLUMEN DEL SEDIMENTO (cm³)				9	9
PESO ESPECÍFICO APARENTE DEL LLENANTE				2,823	2,823
CONCENTRACIÓN CRÍTICA DEL LLENANTE				0,417	0,417
PROMEDIO				0,417	

INMERSIÓN-COMPRESIÓN					
NORMA UTILIZADA					INV E-738-747
SERIE No.	BRIQUETA No.	ALTURA BRIQUETA (cm)	DENSID AD (Kg/m³)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS NO SUMERGIDAS A (Kg/cm²)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS SUMERGIDAS B (Kg/m²)
1	1	9,8	2414	51,2	
	2	10,0	2407	51,8	
	3	10,0	2419	50,9	
	Promedio:	9,9	2413	51,3	
2	6	9,9	2422		45,1
	7	10,0	2410		42,1
	8	9,8	2401		42,1
	Promedio:	9,9	2411		43,1
INDICE DE RESISTENCIA CONSERVADA = B/A * 100 = 84 %					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (MATERIALES)					
NORMA UTILIZADA				INV E-123-125-126	
CLASIFICACION DE SUELOS (U.S.C - AASHTO)					
PESO TOTAL		2000,0			LIMITE LIQUIDO
TAMIZ		PESO. RET INDI	% RET. INDIV.	% QUE PASA	ENSAYO N°
Pulg	mm				
3"	76,20	0,0	0,0	100,0	TARA N°
2-1/2"	63,50	0,0	0,0	100,0	N° DE GOLPES
2"	50,80	0,0	0,0	100,0	PESO SUELO+TARA HUMEDO
1-1/2"	38,10	0,0	0,0	100,0	PESO SUELO+TARA SECO
1"	25,40	0,0	0,0	100,0	PESO TARA
3/4"	19,05	0,0	0,0	100,0	% DE HUMEDAD
1/2"	12,70	321,8	16,1	83,9	
3/8"	9,52	326,5	16,3	67,6	
N°4	4,76	433,8	21,7	45,9	
N°10	2,00	303,6	15,2	30,7	
N°20	0,85	0,0	0,0	30,7	
N°40	0,43	329,0	16,5	14,3	
N°80	0,18	116,7	5,8	8,4	

N°200	0,02	84,3	4,2	4,2
Pasan		84,3	4,2	
Totales =		2000,0		
CLASIFICACION				
LIMITE LIQUIDO		NL		AASHTO
LIMITE PLASTICO		NP		A-1-a
INDICE DE PLASTICIDAD		0		U.S.C.S
INDICE DE GRUPO		0		GW-GM

Figura 25. Análisis granulométrico mezcla asfáltica MSC-2



6.1.4 Diseño Marshall. Ya obtenida la caracterización de los materiales pétreos y el Bioasfalto con sus temperaturas de trabajo para la producción de la mezcla en tibio se procedió a elaborar el diseño Marshall con el fin de obtener la formula de trabajo para la elaboración de las probetas y evaluar su desempeño, los resultados se presentan a continuación.

6.1.4.1. Objetivo. Definir el contenido óptimo de asfalto y la gradación de los agregados, de manera que la mezcla asfáltica obtenida en planta cumpla con los requisitos de gradación, estabilidad, fluencia, densidad y porcentajes de vacíos, de

acuerdo con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras – INVÍAS 2007.

El diseño resultante se traduce en una "FÓRMULA DE TRABAJO" que permite evaluar las características de la mezcla bajo cualquier circunstancia.

La "FÓRMULA DE TRABAJO" en el presente estudio, está basada en el empleo de los materiales en las proporciones determinadas, también se tuvo en cuenta la concentración crítica del llenante mineral para el control de la relación filler/betún durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en planta. Cualquier cambio en la procedencia de los agregados y/o su proporcionamiento en la mezcla implica modificaciones en el diseño.

6.1.4.2. Características de los agregados. Se determinaron en el laboratorio las propiedades de los materiales requeridos en la especificación del Invías 2007 en el artículo 400, tabla 400.1 (c).

La gradación de la mezcla se obtuvo de un Todo Uno tomado en planta con adición de 5% de cal hidratada NARE respecto al peso del llenante.

De acuerdo con la gradación obtenida, la mezcla cumple los requisitos granulométricos exigidos por el Invías para concretos asfálticos, encontrándose un 54.1% de gruesos, un 41.7% de finos y un 4.2% de llenante.

Tabla 17. Características granulométricas de la muestra

Tamiz	Combinación	Especificación		Tolerancias	
3/4"	100	100	100	100	100
1/2"	84	80	95	80	91
3/8"	68	65	80	65	72
No. 4	46	40	55	42	50
No. 10	31	24	38	28	34
No. 40	14	9	20	11	17
No. 80	8	6	12	6	11
No. 200	4.2	3	7	3.2	5.2

Tabla 18. Caracterización del agregado grueso

Ensayo	Resultados	Especificación Inviás ART. 400-07
Peso Específico Aparente	2.861	--
Peso Específico Aparente SSS	2.892	--
Peso Específico Nominal	2.953	--
Absorción	1.09%	--
Desgaste en La Máquina de Los Ángeles	23.7%	25% máx
Desgaste Micro-Deval	4.3%	20% máx
10% de Finos	257.64 KN 207.45 KN 80.5%	Seco: 110 KN mín Húmedo: -- Húmedo/Seco: 75% mín
Solidez en Sulfato de Sodio	0.7%	12% máx
Caras Fracturadas	88/81	1 cara/ 2 caras 85/70 mín
Partículas Planas y Alargadas (relación 1:5)	1.0%	10% máx
Limpieza Superficial del Agregado Grueso	0.45%	0.5% máx

Tabla 19. Caracterización del agregado fino

Ensayo	Resultados	Especificación Invías ART. 400-07
Peso Específico Aparente	2.766	--
Peso Específico Aparente SSS	2.792	--
Peso Específico Nominal	2.840	--
Absorción	0.94%	--
Solidez en Sulfato de Sodio	1.1%	12% máx
Angularidad (método A)	49.1%	45% mín

Tabla 20. Caracterización del llenante

Ensayo	Resultados	Especificación Invías ART. 400-07
Peso Específico del Llenante	2.768	--
Concentración Crítica del Llenante	0.417	Mayor que la concentración real
Peso Unitario Aparente del Llenante en Tolueno + 5% de cal hidratada NARE	0.8 g/cm ³	0.5 a 0.8 g/cm ³
Vacíos del llenante compactado en seco	41.62	38% mín

Tabla 21. Caracterización de los agregados combinados

Ensayo	Resultados	Especificación Invías ART. 400-07
Índice de Plasticidad	NP	NP
Equivalente de Arena	61%	50% mín

Con los valores de los pesos específicos y de acuerdo con la composición granulométrica se calculó "el peso específico ponderado de los agregados" encontrándose un valor de 2.817 el cual se usará en los diseños para el cálculo de los diferentes volúmenes de agregados y porcentajes de vacíos.

6.1.4.3 Características del cemento asfáltico. El asfalto utilizado fue Normalizado de penetración 60-70 modificado con crudo de palma al 1%,

Tabla 22. Características del cemento asfáltico

Ensayo	Resultado
Peso Específico	1.006
Penetración a 25°C (0.1 mm)	62
Punto de ablandamiento (°C)	51
Índice de Penetración	-0.41

6.1.4.4 Determinación de las temperaturas de mezclado y compactación. De acuerdo con la curva reológica obtenida para el asfalto modificado con el 1% de crudo de palma, la cual fue hecha en laboratorio, y se anexa al final del informe, las temperaturas requeridas son las siguientes.

	Temperatura (°C)
Mezclado en planta	134-138
Compactación en laboratorio	126-129

La temperatura de calentamiento de los agregados es +10°C de la temperatura del asfalto, estando este rango establecido en las temperaturas de trabajo de dicha curva reológica.

6.1.4.5 Diseño Marshall.

- **Preparación de las probetas.** Mediante el ensayo Marshall se determina el contenido óptimo de betún para una mezcla de agregados de composición y granulometría determinada. Para ello se prepararon cinco juegos de tres briquetas con 75 golpes por cada cara con incrementos del medio por ciento (0.5%) en el contenido de betún en peso sobre la mezcla total.

Los contenidos de asfalto variaron desde 4.0 hasta 6.5%, los agregados en fracciones representativas fueron calentados a una temperatura de 165°C, el asfalto se calentó a 155°C y se mezclaron hasta obtener un conjunto homogéneo.

- **Compactación de las probetas.** Las probetas se compactaron a una temperatura de 140°C con 75 golpes por cada cara, con la energía de compactación correspondiente a un martillo de 10 lbs de peso y 18" de caída.

- **Densidad de probetas.** Esta determinación se realiza cuando las probetas recién compactadas se han enfriado a la temperatura ambiente, determinándole a cada una de las 18 briquetas el peso en el aire y en el agua. Dichos resultados aparecen en el cuadro de diseño de mezcla asfáltica.

- **Determinación de la estabilidad y la deformación.** Una vez determinada la densidad de las probetas, se realizan los ensayos de estabilidad y deformación, previa inmersión en un baño de agua a 60°C y durante un tiempo de 30 minutos, luego se ensayan en el aparato Marshall las probetas, midiendo su estabilidad y su fluencia; los valores de la estabilidad de las probetas, cuya altura no está comprendida dentro de las tolerancias ($2\frac{1}{2}'' + \frac{1}{8}''$) se corrigen multiplicándolos por un factor correspondiente después de medir su altura o su volumen con precisión.

Los valores medios de la estabilidad y la deformación para cada porcentaje de betún aparecen en el cuadro de "Diseño de mezclas asfáltica".

- **Porcentaje en volumen.** Los resultados de los porcentajes de asfalto, agregados y vacíos medidos con relación al volumen total de la mezcla aparecen en el cuadro "Diseño de mezcla asfáltica".

- **Porcentaje de vacíos.** Se calcularon los porcentajes de vacíos en los agregados, en la mezcla total y llenos con asfalto, los correspondientes resultados aparecen en el cuadro "Diseño de mezcla asfáltica".
- **Densidad teórica máxima medida (método Rice).** Para cada contenido de asfalto se determinó el peso específico teórico máximo (INV E-735), dato necesario para el cálculo del porcentaje de vacíos con aire en la mezcla (INV E-736) y para determinar el porcentaje de asfalto absorbido (INV E-781).
- **Curvas de diseño.** Con la información de los cuadros anexos se graficaron las curvas empleadas en el método Marshall para definir la "FORMULA DE TRABAJO".

Las gráficas de dichas curvas aparecen en la figura 26 y son las siguientes:

Densidad vs contenido de asfalto.

Estabilidad vs contenido de asfalto.

Fluencia vs contenido de asfalto.

% de vacíos en la mezcla total vs contenido de asfalto.

% de vacíos llenos con asfalto vs contenido de asfalto.

% de vacíos en los agregados vs contenido de asfalto.

Para llegar al contenido óptimo de asfalto se tuvieron en cuenta las Especificaciones del Instituto Nacional de Vías.

Gradación	:	MSC-2
Estabilidad	:	Mínimo 900 Kg
Flujo	:	Entre 2 – 3.5 mm
Vacíos en la mezcla total	:	Entre 4 – 6%
Vacíos en los agregados	:	Mínimo 15%

Vacíos llenos con asfalto	:	Entre 65 – 75%
Relación llenante/ligante efectivo	:	0.8 – 1.2
Relación estabilidad/flujo	:	300 – 600 Kg/mm
Tracción Indirecta	:	Mínimo 80%

6.1.4.6 Fórmula de trabajo. De acuerdo con los resultados obtenidos, las normas de diseño del Invías y la experiencia de esta oficina en el diseño de mezclas asfálticas se escogió la siguiente "FÓRMULA DE TRABAJO"

Gradación	:	MSC-2
Contenido óptimo de asfalto	:	4.6%
Densidad	:	2499 Kg/m ³
Estabilidad Marshall	:	1245 Kg
Flujo	:	2.8 mm
Vacíos en la mezcla total	:	4.7 %
Vacíos en los agregados	:	15.1 %
Vacíos llenos con asfalto	:	68.6 %
Relación estabilidad/flujo	:	444.6 Kg/mm

6.1.4.7 Relación llenante / ligante efectivo. Las especificaciones del Invías establecen que la relación llenante/ligante efectivo de la mezcla óptima debe estar entre 0.8 y 1.2. Para ésta mezcla en particular la relación llenante / ligante efectivo presenta un valor de 0.98.

6.1.4.8 Concentración crítica del llenante. La concentración crítica del llenante obtenida en el ensayo, debe ser mayor que la concentración real del volumen de llenante.

La concentración real del volumen de llenante se determina mediante la siguiente expresión:

$$C_v = F/(F+A)$$

Donde: C_v : Concentración real del volumen de llenante
 F : Volumen de llenante en la mezcla
 A : Volumen de asfalto en la mezcla

Los resultados obtenidos son:

Concentración crítica del llenante: 0.417

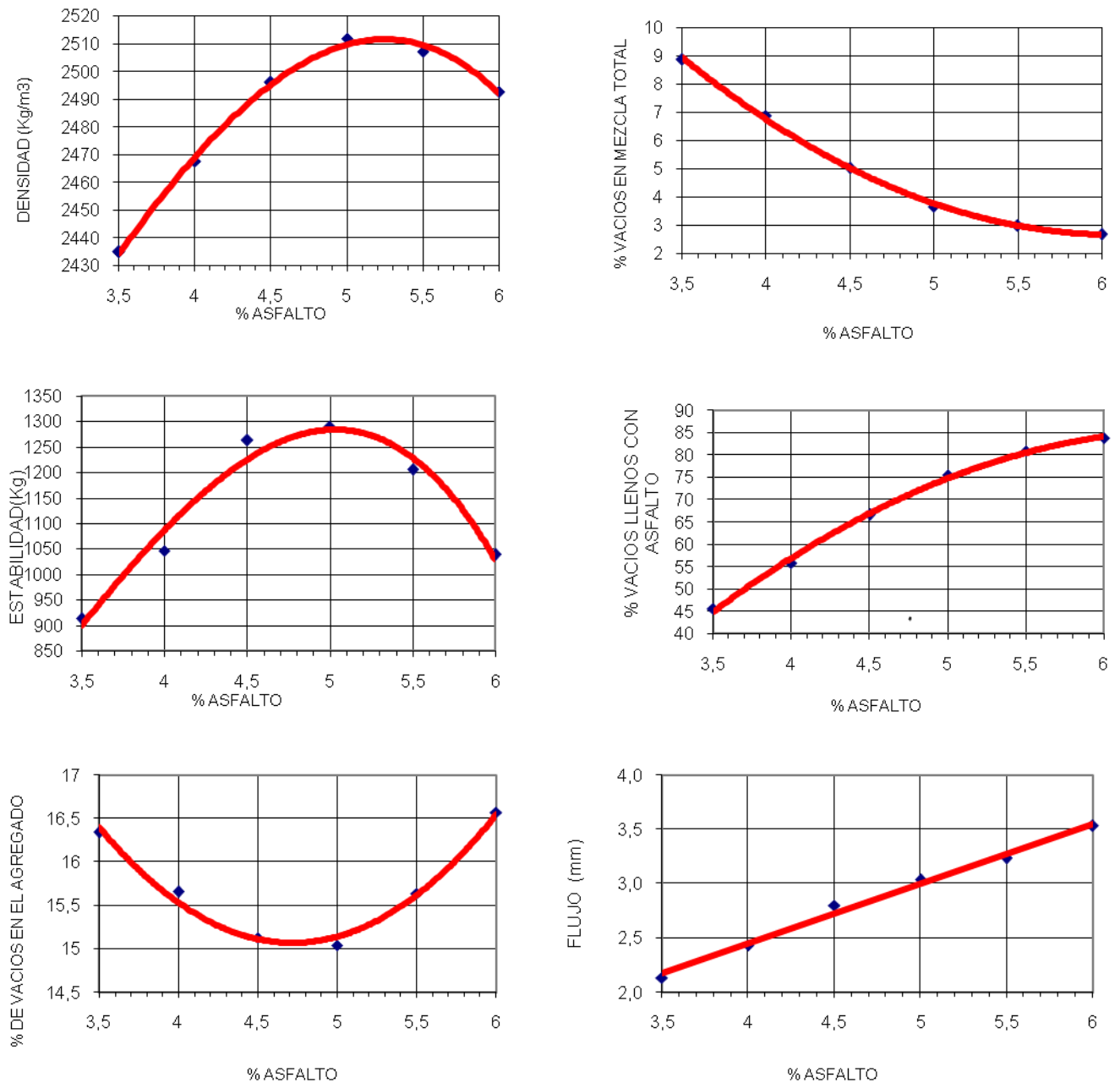
Concentración real del llenante: 0.257

Como se puede observar la concentración crítica del llenante es mayor que la real, por lo tanto se está cumpliendo con este requisito.

6.1.4.9 Resistencia conservada mediante el ensayo de tracción indirecta. En este ensayo se establece la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas, mediante la comparación de la resistencia a la tracción indirecta de briquetas sometidas a la acción del agua y briquetas curadas al aire. Este ensayo se realiza sobre briquetas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto, los resultados obtenidos muestran una relación de resistencia a la tensión del 84.4 %

En la figura que a continuación se presenta se presenta el diseño de las mezclas asfálticas mediante el método Marshall. Las curvas obtenidas corresponden a los diferentes ítems de la mezcla analizados.

Figura 26. Curvas Marshall



6.1.4.10 Índice de película de ligante. Los resultados para el índice de película de ligante se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 23. Índice de película de ligante

Porcentaje que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4)	a	46
Porcentaje que pasa el tamiz de 2.36 mm (No. 8)	b	35
Porcentaje que pasa el tamiz de 1.18 mm (No. 16)	c	26
Porcentaje que pasa el tamiz de 0.60 mm (No. 30)	d	18
Porcentaje que pasa el tamiz de 0.30 mm (No. 50)	e	12
Porcentaje que pasa el tamiz de 0.15 mm (No. 100)	f	7
Porcentaje que pasa el tamiz de 0.075 mm (No. 200)	g	4.2
ÁREA SUPERFICIAL DEL AGREGADO COMBINADO, m²/kg	A	4.80
Contenido de asfalto efectivo (% de la masa de la mezcla)	Pbe	4.1
Contenido de asfalto total (% de la masa total de la mezcla)	Pb	4.6
Densidad del ligante a 25°C, t/m ³	Db	1.01
Densidad bulk combinada del agregado, t/m ³	Dsb	2.82
ÍNDICE DE PELÍCULA DE LIGANTE	IPL	9.5

6.2 RESULTADOS

6.2.1 Generalidades. A continuación se presentan los resultados del informe técnico para dicha mezcla

Tabla 24. Recepción y descripción de materiales

CODIGO DEL MATERIAL			G-115-11	ORDEN DE TRABAJO	77
FECHA			NOMBRE DEL CLIENTE:	CONRADO LOPERA - SHELL COLOMBIA	
2011	5	3			
AÑO	MES	DÍA			
CÓDIGO DE MUESTRA			DESCRIPCIÓN Y/O OBSERVACIONES (Código, clase, cantidad, características, anomalías, desviaciones de las condiciones normales de la muestra.)		
G-115-11-1			35 Kg de mezcla asfáltica tibia.		
RECIBIDO POR:			Edgar Peña Acosta		Si no aplica la información de alguna casilla diligenciar : N.A

Tabla 25. Fecha de realización de ensayos

ENSAYO	FECHA
Módulo dinámico (5, 20, 40 °C; y 10 Hz)	2011/05/30
Ley de fatiga (20°C; 2,5 Hz)	2011/06/07
Deformación permanente	2011/05/31

6.2.2 Procedimientos.

6.2.2.1 Peso específico aparente y unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes saturados con superficie seca. Se utiliza la norma I.N.V E 733, el método permite determinar el peso aparente de mezclas asfálticas, lo cual es útil para calcular el porcentaje de vacíos, la compactación y el peso unitario de mezclas asfálticas densas

6.2.2.2 Módulos Dinámicos. Se utiliza equipo NAT de acuerdo con la norma prNE 12697-26 Método IT-CY y con un porcentaje de incertidumbre de +/-1.146% para un nivel de confianza del 95%.

Con esta prueba se determina el módulo dinámico de una probeta tipo Marshall, por medio del principio de tensión indirecta. El principio enuncia que al aplicar una carga compresiva a través del diámetro de una muestra cilíndrica, se produce una tensión sobre un diámetro ortogonal al cual se aplica la carga. Al registrar la carga vertical aplicada y la deformación horizontal producida se obtiene el módulo dinámico [MPa].

Con base en la prueba de tensión indirecta y teniendo en cuenta que esta prueba no es destructiva, podemos evaluar la incidencia de la temperatura en el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica realizando ensayo a temperaturas en un rango de temperaturas establecido, con lo cual construimos un gráfico

semilogarítmico del valor del módulo en función de la temperatura, denominado curva maestra.

6.2.2.3 Deformación Permanente. Bajo la norma B.S. DD 226, la prueba de deformación permanente, consiste en determinar la resistencia al ahuellamiento debida a la aplicación de cargas de tránsito, las cuales se simulan por medio del equipo NAT controlando las condiciones de ensayo.

Las briquetas se miden, y acondicionan a una temperatura de 40 °C, durante un tiempo no inferior a 2 horas, al cabo de las cuales se procede a montar cada una de ellas en el marco de ensayo, donde se realiza la prueba bajo las siguientes condiciones:

- a. Esfuerzo aplicado de 100 Kpa
- b. 3600 ciclos de aplicación la carga
- c. Temperatura 40° C

6.2.2.4. Fatiga por Tracción Indirecta (Fatiga a esfuerzo controlado). Se realiza la prueba con equipo NAT bajo la norma prEN 12697-24 con un porcentaje de incertidumbre de $\pm 0.5 \times 10^6$ ciclos de carga para una diferencia de ± 13 microstrain para un nivel de confianza del 95%.

La prueba de fatiga por tracción indirecta se realiza midiendo los módulos a diferentes niveles de esfuerzo de tal manera que la deformación unitaria resultante este en el rango de 100 a 400 $\mu\epsilon$. particularmente se hacen pruebas por pares de briquetas sumando en total 9 briquetas y 9 puntos para la elaboración de la ley de fatiga. Sin embargo se puede realizar una ley de tipo restringido utilizando sólo tres (3) especímenes, pero si el valor del coeficiente de correlación estadística R^2 es menor que 0.90, se debe incrementar el número de especímenes. A medida que se reduce el número de especímenes se incrementa incertidumbre sobre el

ensayo, es importante tener en cuenta que los especímenes deben ser lo más homogéneos entre sí, en cuanto a altura, diámetro y densidad.

Una vez se han realizado las pruebas de módulos dinámicos a esfuerzo controlado, se procede a realizar la prueba de fatiga, aplicando los mismos valores de esfuerzo aplicados en la prueba de módulos dinámicos. La carga se repite tantas veces como sea necesario para que los LVDTs registren un desplazamiento vertical de 10 mm. Generalmente la frecuencia de carga es de 2.5 Hz, y la temperatura de 20 °C. La frecuencia del ensayo puede variar entre 2.5, 5.0 y 10 Hz

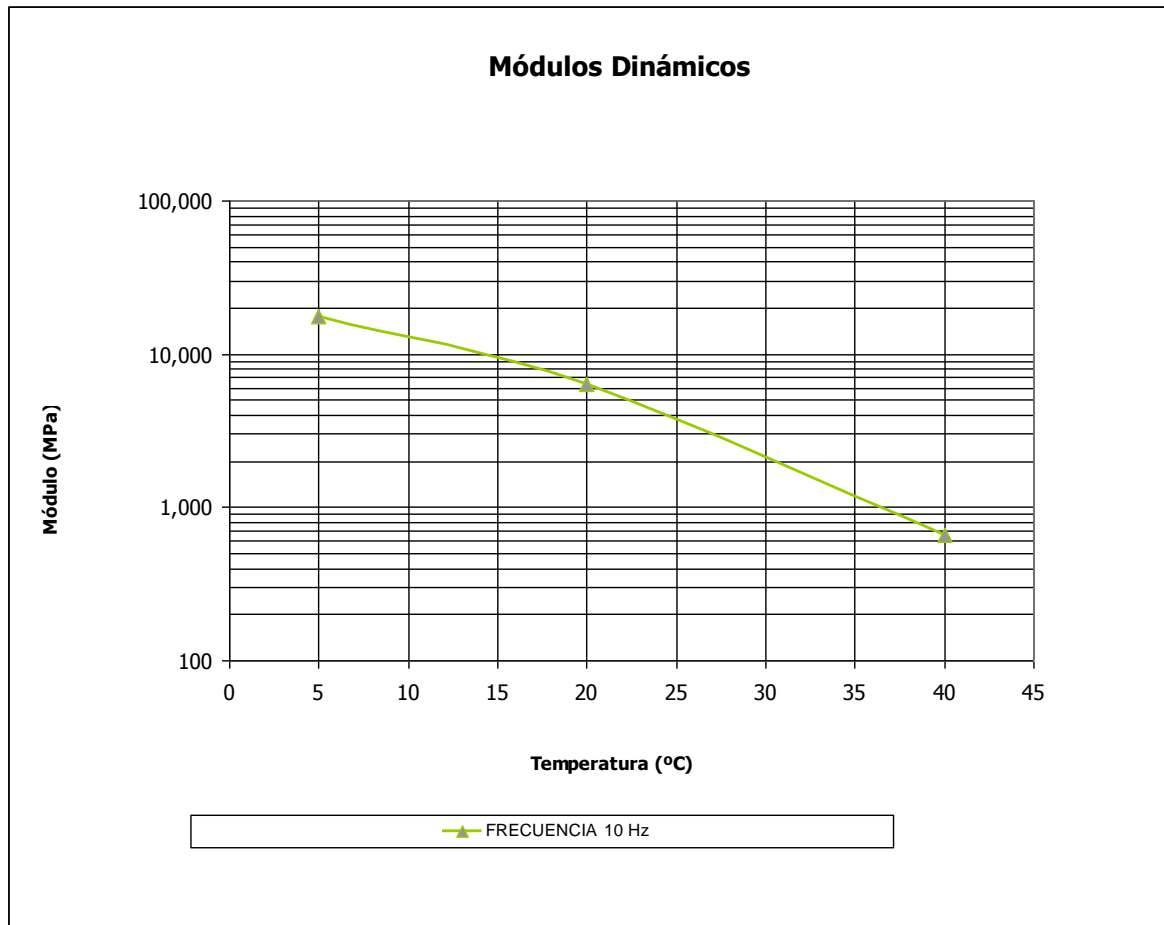
6.2.3 Resultados del estudio técnico

6.2.3.1 Módulos dinámicos, ITSM. Los módulos dinámicos se realizaron a una (1) frecuencia (10 Hz) y a tres (3) temperaturas (5°, 20° y 40° Celsius).

Tabla 26. Resumen Módulos dinámicos de la mezcla G-115-11

Temperatura, °C	5			20			40		
Núcleo	1	3	4	1	3	4	1	3	4
BULK	2,494	2,496	2,491	2,494	2,496	2,491	2,494	2,496	2,491
Frecuencia, Hz	10,0								
Módulo	17011	18666	16520	5922	6536	6804	547	749	703
Dinámico (MPa)	17397	17633	18466	5616	6617	6674	554	729	715
Promedio (MPa)	17204	18150	17493	5769	6577	6739	551	739	709
Promedio, MPa	17616			6362			666		
Error, %	2.3	-5.5	11.8	-5.2	1.2	-1.9	1.3	-2.7	1.7

Figura 27. Curva Maestra del módulo dinámico. G-115-11



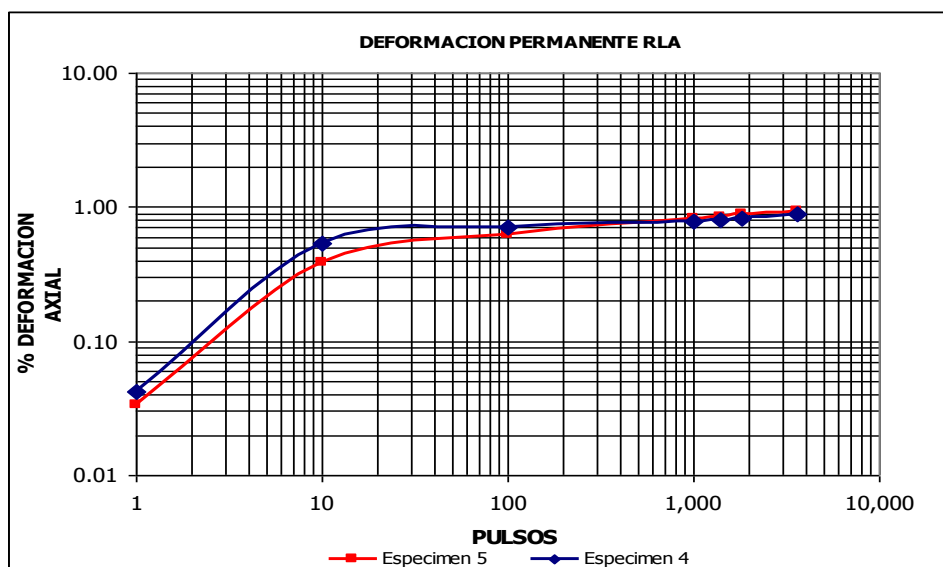
6.2.3.2. Deformación permanente. La prueba es útil para identificar el potencial de ahuellamiento de una mezcla asfáltica, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

1. La mezcla no será ahuellable si al cabo de los 3600 ciclos de carga el porcentaje de deformación axial (relación entre la deformación vertical final y el espesor inicial) en los especímenes es menor del 1%.
2. La mezcla podrá ser ahuellable si esta deformación axial se encuentra entre el 1% y el 2%.
3. La mezcla no cumple por ahuellamiento cuando esta deformación supera el 2%.

Tabla 27. Deformación permanente de mezclas asfálticas. G-115-11

Espécimen	4	5
Altura (mm)	55,1	55,3
Diámetro (mm)	100,3	100,0
Densidad Aparente BULK	2,491	2,487
Temperatura de ensayo (Celsius)	40	40
Esfuerzo de ensayo (100 KPa)	100	100
Duración del ensayo (pulsos)	3600	3600
Esfuerzo de acondicionamiento (KPa)	10	10
Período de acondicionamiento (seg.)	120	120
Deformación axial después de acondicionamiento, %	0,0416	0,0332
Deformación axial después de 10 Pulsos, %	0,5373	0,3911
Deformación axial después de 100 Pulsos, %	0,7121	0,6248
Deformación axial después de 1000 Pulsos, %	0,7905	0,8259
Deformación axial después de 1400 Pulsos, %	0,8069	0,8555
Deformación axial después de 1800 Pulsos, %	0,8276	0,8794
Deformación axial después de 3600 Pulsos, %	0,8976	0,9416
Promedio de Deformación, %	0,9196	

Figura 28. Deformación permanente de la mezcla asfáltica G-115-11



6.2.3.3 Fatiga a esfuerzo controlado. Los resultados de las pruebas de resistencia a la fatiga y módulo dinámico por esfuerzo controlado se presentan en las siguientes tablas. Las condiciones normales de ensayo son 20°C de temperatura y diferentes niveles de esfuerzo horizontal inducido y frecuencia de 2,5 Hz.

Tabla 28. Resultados del análisis de Ley de Fatiga G-115-11

Probeta	$\sigma_{Xmax}(KPa)$	Módulo** (MPa)	Nº CICLOS ¹	Strain ($\mu\epsilon$)	Bulk
15	550	3191.5	492	353,3	2,487
13	530	3538.5	480	307,1	2,487
19	380	3016.5	1778	258,2	2,494
20	340	3249.0	1641	214,5	2,490
11	350	3521.5	2116	203,7	2,496
3	300	3356.0	2317	183,3	2,496
14	200	3209.0	9804	127,8	2,504

** Módulo Dinámico a esfuerzo controlado

En la tabla 29 se presentan los resultados de la regresión lineal de los datos de la ley de fatiga para el material, que corresponden a la ecuación de la ley de fatiga representada de la siguiente forma:

$$\text{Log}(y) = a\text{Log}(x) + b$$

Donde:

Y= STRAIN ($\mu\epsilon$)

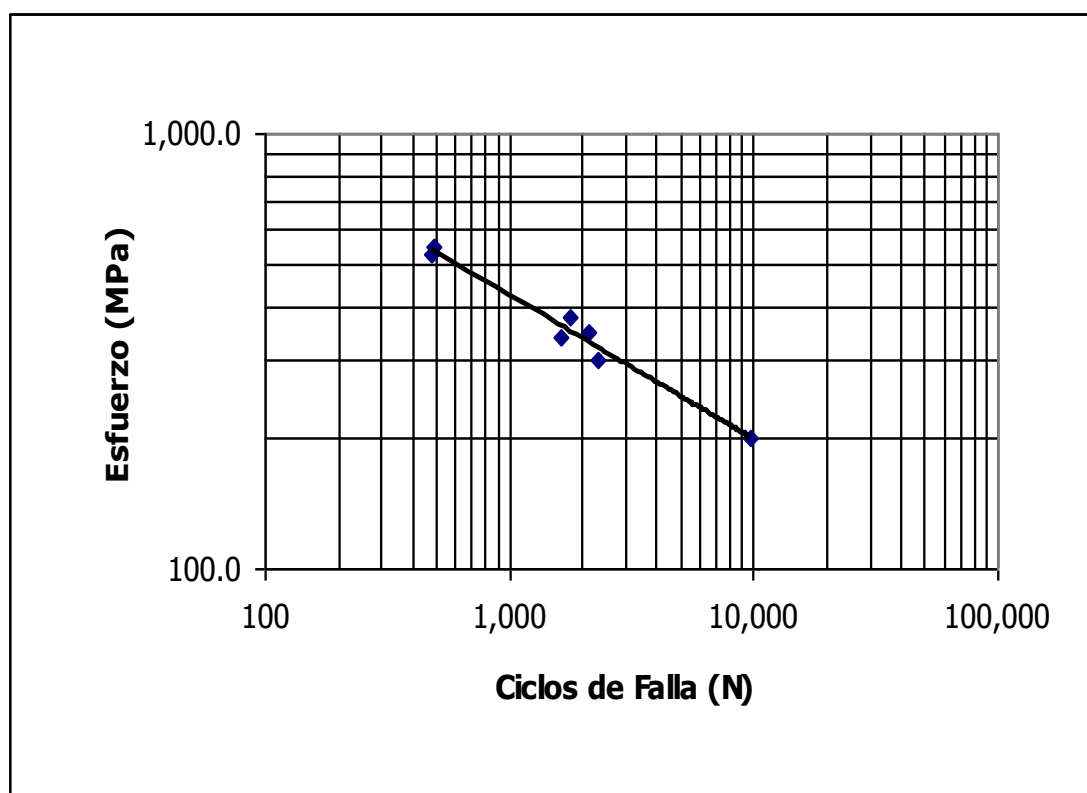
X= NUMERO DE CICLOS DE FALLA

¹ El número de ciclos reportados corresponden a los de rotura de la probeta de ensayo. Con este valor es calculada la pendiente de fatiga por tracción indirecta a esfuerzo controlado. Se hace de acuerdo a lo enunciado en la nota del numeral E.5.2. de la norma prEN 12697-24. Allí se considera, por este método, que la vida a la rotura se puede definir como el tiempo necesario para que la deformación alcance el doble de su valor inicial.

Tabla 29. Constantes de ecuación de ley de fatiga G-115-11

a	b	R²
-0,319	3,376	0,929

Figura 29. Fatiga a esfuerzo controlado para los especímenes



Fuente: ensayos elaborados en corasfaltos

Con base en los resultados de laboratorio se elabora cuadro comparativo de desempeño de mezclas asfálticas en Caliente y mezclas asfálticas tibias (ver tabla 30)..

Tabla 30. Cuadro comparativo de desempeño

COMPARACION EN DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS			
TIPO DE MEZCLA	MODULO DINAMICO FRECUENCIA 10 HERTZ		
	5°	20°	40°
MSC-2 CALIENTE	18901 Mpa	5697 MPa	1168 MPa
MSC-2 TIBIA	17616 Mpa	6362 MPa	666 Mpa
TIPO DE MEZCLA	LINEA DE FATIGA A ESFUERZO CONTROLADO		
	a	b	c
MSC-2 CALIENTE	-0.363	3.568	0,961
MSC-2 TIBIA	-0,319	3,376	0,929
TIPO DE MEZCLA	DEFORMACION PERMANENTE %		
MSC-2 CALIENTE	1.0345		
MSC-2 TIBIA	0,9196		

Fuente: este estudio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De acuerdo a la bibliografía obtenida y con base en los resultados de ensayos de laboratorio, podemos afirmar que las mezclas asfálticas tibias ofrecen una gran solución para minimizar el impacto medioambiental que generan la emisión de gases debido a la combustión y calentamiento de materiales. En el mundo hay una gran variedad de tecnologías con las cuales se pueden producir mezclas tibias; el crudo de palma de Colombia es otra alternativa viable que se puede tener en cuenta para este fin.
- Las pruebas de laboratorio muestran al crudo de palma como un aditivo de gran potencial reductor de viscosidad y a su vez la mezcla producida con este refleja una buena resistencia mecánica y desempeño producidas a menor temperatura.
- De los tres tipos de crudo de palma que se evaluaron, el que brindó el mejor resultado como reductor fue el de dismaprim, dado que se obtuvieron los valores más altos de reducción en viscosidad, por esta razón fue el utilizado para modificar el asfalto base al 1%.
- Las mezclas asfálticas tibias producidas con bioasfaltos se pueden considerar otra opción de pavimentación, la cual nos brinda beneficios económicos, técnicos y ambientales.
- De la elaboración de este trabajo se desprenden varios interrogantes que pueden ser el inicio de investigaciones futuras y de las cuales se hace mención a dos de ellas:

- Con base en el módulo dinámico obtenido y considerando la caracterización de los materiales que hacen parte de la mezcla, evaluar dentro del número estructural el coeficiente de capa equivalente para este valor, considerando un factor de seguridad asociado a dicho módulo.
- Dado que el crudo de Palma es considerado un aditivo orgánico, evaluar el comportamiento del bioasfalto en su estructura química.

BIBLIOGRAFÍA Y CIBERGRAFÍA

AMESTOY ALONSO, José. El planeta tierra en peligro. Calentamiento global, cambio climático, solución. Alicante, España: Editorial Club Universitario. 2010.

BIBSTOR, Bob. A tale of two mixes a contractor experiences. Annual Meeting of National Association Research Board, National Academy of Sciences. Washington. 2007.

CERVARICH, M. Foaming the Asphalt: New Warm-Mix Technique Challenges Conventional Wisdom. En: Revista Hot Mix Asphalt Technology. V. 12, No. 4. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association. Julio/Agosto 2007.

CHAMBERS, D. Warm Mix Green Asphalt Technology. Annual Meeting of National Association of Transportation Research Board. Washington. 2007.

CROTEAU, Jean-Martin, & TESSIER, Bernard. Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's Perspective (ponencia). Conferencia anual de la Asociación de Transportadores de Canadá. 2008.

D'ANGELO, HARM, BARTOSZEK, BAUMGARDNER, CORRIGAN, COWSERT, HARMAN, JAMSHIDI, JONES, NEWCOMB, PROWELL, SINES, AND YEATON. Warm-Mix asphalt: European Practice. United States: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. 2008.

<http://www-static.shell.com>

<http://fs1.hotmix.org>

<http://www.fedepalma.org>

KRISTJANSDDOTTIR, O. Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. Tesis de grado para optar el título de MSc en Ingeniería Civil, University of Washington. 2008.

LECOMTE, M., DEYGOUT, F. & MENETTI, A. Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying temperatures. Shell Bitumen. 2008.

MORALES BARROSO, José y GÓMEZ MORENO, Ángel (Eds.). La red inteligente: ahorro energético y telecomunicaciones. Madrid, España: L&M Data Communications.

MULLINS, Oliver, SHEU, Eric, HAMMAMI, Ahmed & MARSHALL, Alan. Asphaltenes, heavy oils, and petroleomics. New York, EE.UU: Springer. 2007.

MUÑOZ TORRES, María Jesús y DE LA CUESTA GONZÁLEZ, Marta (Eds.). Dimensión medioambiental de la RSC. La Coruña, España: Netbiblo. 2010.

O.R. LARSEN. Warm foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA. III Eurasphalt & Eurobitume Congress. Viena. 2004.

PROWELL, Brian & GRAHAM, Hurley. Expect Cooler Temperatures: Ongoing Research at NCAT. En: Revista Roads and Bridges V. 43, No. 12. Illinois, EE.UU: Scranton Gillette Communications. 2005.

VAITKUS, A. V. The Research on the use of warm mix. Baltic Institute. Riga, Letonia: World Resources Institute. 2009.